

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Đurđica Španiček

Martina Sokolić

Zagreb, 2009.

Izjavljujem da sam diplomski rad radila samostalno
uz konzultacije i korištenje navedene literature,
te stečenim znanjem tijekom studija.

Martina Sokolić

Zahvaljujem Prof.dr.sc. Đurđici Španiček te tehničkim suradnicima
Vesni Torjanac i Božidaru Bušetinčanu na stručnoj i nesebičnoj pomoći.

Posebna zahvala roditeljima i prijateljima

SAŽETAK

Cilj rada je određivanje utjecaja djelovanja medija; destilirane i morske vode, na drvno-polimerni kompozit praćenjem promjena nekih njegovih svojstava; tvrdoće i prividne međuslojne čvrstoće.

U tu svrhu provedeno je ispitivanje dvadeset ispitaka, deset ispitaka slojevitog kompozita mahagonij-poli(vinil-klorida) i deset ispitaka kompozita tikovina-poli(vinil-klorid). Pet ispitaka jednog i pet ispitaka drugog kompozita bili su izloženi djelovanju destilirane, a jednak broj jednih i drugih ispitaka djelovanju morske vode u termostatu pri temperaturi od 50 °C.

U prvom, teoretskom dijelu, obrađeni su konstituenti kompozita i njihova svojstva. *Prvo* poglavlje govori općenito o kompozitima. *Drugo* poglavlje navodi vrste i svojstva konstituenata, što je od velikog značaja pri njihovom odabiru kod formiranja kompozita. U *trećem* poglavlju opisani su neki osnovni postupci proizvodnje kompozita i navedene njihove prednosti i nedostaci. Zakonom miješanja obrađenim u *četvrtom* poglavlju predloženi su izrazi pomoću kojih se mogu predvidjeti mehanička svojstva kompozita. *Peto* poglavlje bavi se problematikom međuslojnog područja u kojem dolazi do interakcije ojačala i matrice, odnosno njihove adhezije, i koje mora biti dobro konstruirano kako bi se postigla optimalna svojstva i učin kompozitnih materijala. Utjecaj medija na kompozit, posebice na njegovo međuslojno područje, tema je *šestog* poglavlja. *Sedmo* poglavlje opisuje svojstva i primjenu drvno-plastomernih kompozita, s posebnim osvrtom na prirodna ojačala. *Osmim* poglavljem predložene su osnovne karakteristike drva kao građevnog materijala te njegova mehanička i fizikalno-kemijska svojstva. *Deveto* poglavlje posvećeno je šupljikavim materijalima kojima pripada i upjenjeni PVC, jedan od konstituenata ispitivanog kompozita.

Drugi dio rada je eksperimentalni dio. Ovdje se u *desetom* poglavlju opisuje način i princip određivanja upijanja vode u 29-dnevnom ciklusu uranjanja u vodu, tvrdoće te prividne međuslojne čvrstoće drvno-polimernog kompozita.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	VII
POPIS TABLICA.....	X
POPIS OZNAKA	XII
1. UVOD	1
1.1 PRIMJENA KOMPOZITA	2
2. OSNOVNI KONSTITUENTI KOMPOZITA	5
2.1 MATRICE	5
2.2. OJAČALA.....	13
3. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA	25
4. ZAKON MIJEŠANJA	33
5. MEĐUPOVRŠINE I MEĐUSLOJEVI.....	35
5.1 TERMODINAMIKA MEĐUSLOJA	41
5.2 MODIFIKACIJA POVRŠINA.....	44
6. UTJECAJ MEDIJA NA KOMPOZIT	48
7. KOMPOZITI S PRIRODNIM VLAKNIMA.....	50
7.1 DRVNO-PLASTOMERNI KOMPOZITI.....	58
8. DRVO	63
8.1 MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA	65
8.2 SADRŽAJ VODE (VLAGE)	71
9. ŠUPLJIKAVI MATERIJALI.....	76
9.1 POLI (VINIL-KLORID)	76
9.2 ŠUPLJIKAVI PROIZVODI	77
10. ISPITIVANJE	86

10.1	UVOD.....	86
10.2	ODREĐIVANJE UPIJANJA VODE.....	89
10.3	ODREĐIVANJE TVRDOĆE	101
10.4	ODREĐIVANJE PRIVIDNE MEĐUSLOJNE SMIČNE ČVRSTOĆE.....	109
11.	ZAKLJUČAK	116
	LITERATURA.....	119

POPIS SLIKA

Slika 1. Svjetska potrošnja kompozita po proizvodima 2005. godine	3
Slika 2. Brod.....	4
Slika 3. Rastezna čvrstoća i rastezni modul različitih vrsta smola.....	7
Slika 4. Tipična krivulja odnosa naprezanja i deformacije za kompozitni material	8
Slika 5. Usporedba deformacija različitih vrsta smola	8
Slika 6. Interlaminarna čvrstoća laminata.....	9
Slika 7. Utjecaj udjela vlakana na rasteznu čvrstoću i rastezni modul kompozita.[2]	16
Slika 8. Raspored vlaknastih ojačala u kompozitu:	17
Slika 9. Utjecaj smjera opterećenja na rasteznu čvrstoću i rastezni modul.....	17
Slika 10. Odnosi naprezanja i deformacija različitih vrsta vlakana	21
Slika 11. Usporedba specifičnog rasteznog modula i specifične čvrstoće najčešće korištenih vlakana.....	21
Slika 12. Usporedba specifičnog rasteznog modula i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita.....	22
Slika 13. Ručno polaganje	26
Slika 14. Naštrcavanje	27
Slika 15. Pultrudiranje	28
Slika 16. Ubrizgavanje smole u kalup	29
Slika 17. Proces ubrizgavanja.....	30
Slika 18. Namatanje.....	31
Slika 19. Shematski prikaz međusloja vlakno-matrica	36
Slika 20. Polietilenske granule, drveno brašno i granule drvno-plastičnog kompozita	60
Slika 21. Strukture tržišta za drvno-plastomerne kompozite 2006. u Zapadnoj Europi	62
Slika 22. Shematski pojednostavljen prikaz stijenke stanice uz orijentaciju mikrofibrila u svakom od slojeva stijenki	64
Slika 23. Celuloza	64

Slika 24. Vlačno opterećenje vlakana	66
Slika 25. Tlačno opterećenje vlakana	66
Slika 26. Tlačno i vlačno opterećenje okomito na vlakna	67
Slika 27. Smik u smjeru vlakana	67
Slika 28. Smik okomito na vlakna	67
Slika 29. Tri osi kod drva	68
Slika 30. Količina vode u drvu	71
Slika 31. Krivulja histereze za običnu adsorpciju – desorpciju pri 40 °C	72
Slika 32. Karakteristično stezanje i deformacija plosnatog, kvaratičnog i okruglog presjeka ovisno o smjeru prstenova rasta	73
Slika 33. 3D Prikaz lanca PVC-a	76
Slika 34. Stvaranje ćelija kod integralnih polistirenskih pjenila	85
Slika 35. Materijali „Deltex“	87
Slika 36. Uzorak kompozita mahagonij-PVC	88
Slika 37. Uzorak kompozita tikovina-PVC	88
Slika 38. Uzorci u kadicama s destiliranom i morskom vodom	89
Slika 39. Kadice s uzorcima u termostatu	89
Slika 40. Analitička vaga	90
Slika 41. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u destiliranu vodu	93
Slika 42. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u destiliranu vodu (srednje vrijednosti)	94
Slika 43. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u morsku vodu	95
Slika 44. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u morsku vodu	95
Slika 45. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u destiliranu vodu	96
Slika 46. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u destiliranu vodu	97
Slika 47. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u morsku vodu ...	98
Slika 48. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u morsku vodu (srednje vrijednosti)	98
Slika 49. Apsorpcijske krivulje za kompozite (srednje vrijednosti)	99

Slika 50. Tvrdomjer	101
Slika 51. Princip određivanja tvrdoće metodom utiskivanja kuglice	101
Slika 52. Utiskivači durometra	106
Slika 53. Durometar	106
Slika 54. Metoda ispitivanja savijanjem na tri točke	109
Slika 55. Princip ispitivanja međuslojne smične čvrstoće metodom savijanja na tri točke	110
Slika 56. Kidalice.....	111
Slika 57. Uzorci kompozita Mahagonij-PVC nakon ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće.	112
Slika 58. Uzorci kompozita Tikovina-PVC nakon ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće.	112
Slika 59. Primjena „Deltex“ kompozita na plovilu	117
Slika 60. Primjena „Deltex“ materijala	118

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjene kompozita u brodogradnji	4
Tablica 2. Osnovne karakteristike pojedinih vrsta smola	9
Tablica 3. Usporedba svojstava najčešće korišteni metalnih kompozita.....	10
Tablica 4. Neka svojstva keramičko kompozita sa SiC matricom ojačanog s kontinuiranim SiC vlaknima.....	11
Tablica 5. Usporedba svojstava materijala matrica.....	12
Tablica 6. Karakteristike najčešće korištenih vlakana.....	15
Tablica 7. Sastav staklenih vlakna.....	19
Tablica 8. Neke prednosti i nedostaci vlaknastih ojačala.....	22
Tablica 9. Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana	51
Tablica 10. Svojstva nekih prirodnih vlakana i E-stakla	52
Tablica 11. Dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana	53
Tablica 12. Vrijednosti rastezne čvrstoće.....	55
Tablica 13. Čvrstoća s obzirom na smjer vlakana pojedinih vrsta drva.....	68
Tablica 14. Toplinska vodljivost nekih materijala	74
Tablica 15. Promjene mase mahagonij-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u destiliranu vodu	91
Tablica 16. Promjene mase mahagonij-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u morsku vodu	91
Tablica 17. Promjene mase tikovina-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u destiliranu vodu.....	92
Tablica 18. Promjene mase tikovina-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u morsku vodu	92
Tablica 19. Vrijednosti promjene mase u postocima.....	93
Tablica 20. Vrijednosti promjene mase u postocima.....	94
Tablica 21. Vrijednosti promjene mase u postocima.....	96
Tablica 22. Vrijednosti promjene mase u postocima.....	97
Tablica 23. Srednje vrijednosti promjene mase u postocima	99
Tablica 24. Dubina prodiranja h za suh kompozite	102

Tablica 25. Dubina prodiranja h za kompozite uronjene u destiliranu vodu	103
Tablica 26. Dubina prodiranja h za kompozite uronjene u morsku vodu.....	103
Tablica 27. Tvrdća suhog kompozita	104
Tablica 28. Tvrdća kompozita uronjenog u destiliranu vodu	105
Tablica 29. Tvrdća kompozita uronjenog u morsku vodu.....	105
Tablica 30. Rezultati mjerenja tvrdoće po Shore-u za kompozit Mahagonij-PVC ..	107
Tablica 31. Rezultati mjerenja tvrdoće po Shore-u za kompozit Tikovina-PVC	107
Tablica 32. Srednje vrijednosti tvrdoće po Shore-u	107
Tablica 33. Međuslojna čvrstoća za suhi kompozit Mahagonij-PVC	113
Tablica 34. Međuslojna čvrstoća za kompozit Mahagonij-PVC uronjen u destiliranu vodu	113
Tablica 35. Međuslojna čvrstoća za kompozit Mahagonij-PVC uronjen u morsku vodu	113
Tablica 36. Međuslojna čvrstoća za suhi kompozit tikovina-PVC	114
Tablica 37. Međuslojna čvrstoća za kompozit tikovina-PVC uronjen u destiliranu vodu	114
Tablica 38. Međuslojna čvrstoća za kompozit tikovina-PVC uronjen u morsku vodu	114

POPIS OZNAKA

R_m , MPa - rastezna čvrstoća

E , MPa - rastezni modul

E_c - rastezni modul kompozita,

E_m - rastezni modul matrice,

E_f - rastezni modul vlakna.

ρ , kg/m³ – gustoća

ρ_c - gustoća kompozita

ρ_m - gustoća matrice

ρ_f - gustoća vlakna

V - volumni udio

V_m - volumni udio matrice

V_f - volumni udio vlakna

W_a - adhezijski rad

γ_{LV} - energija površinske napetosti između okoline i kapljevine

γ_{SV} - energija površinske napetosti između okoline i čvrstog tijela

γ_{SL} - slobodna površinska energija međupovršine čvrsto – kapljevito

θ - kut formiran između površine kapljice i površine čvrstog tijela

H - tvrdoća

b , mm - širina epruvete

h , mm - debljina epruvete

l , mm - dolžina epruvete

F , N – sila (opterećenje)

τ , N/mm² - međuslojna smična čvrstoća

1. UVOD

Kompozitni materijali, jednostavnije kompoziti, jesu umjetno proizvedeni materijali dobiveni spajanjem dvaju ili više različitih sastojaka radi postizanja specifičnih karakteristika i svojstava koja se značajno razlikuju od svojstava ishodnih sastojaka. To su višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih karakteristika konstitutivnih faza. Obično je jedna faza kontinuirana (matrica) i okružuje ostale disperzirane faze (ojačala ili punila).

U građi kompozita razlikuju se njegovi konstituenti:

- Matrica,
- Dodatak.

Temeljna podjela kompozita proizlazi iz vrste matrice kao osnove, te oni mogu biti:

- metalni kompoziti,
- keramički kompoziti,
- polimerni kompoziti.

Prema dodatku (ojačalu) kompozite možemo razvrstati u:

- kompozite s dodatkom čestica, koje mogu biti:
 - velike čestice,
 - male čestice,
- kompozite s dodatkom vlakana, koja mogu biti:
 - duga,
 - kratka,
 - usmjerena,
 - neusmjerena.

- strukturne kompozite:
 - slojeviti kompoziti,
 - stanični kompoziti,
 - sendvič kompoziti.

Ukupno ponašanje i svojstva kompozita određeni su:

- svojstvima osnovnih komponenata,
- veličini i rasporedu konstituenata,
- volumnom udjelu konstituenata,
- obliku konstituenata,
- prirodi i jakosti veze među konstituentima,
- proizvodnim metodama.

1.1. PRIMJENA KOMPOZITA

Kratkim pregledom industrija i proizvoda kod kojih nailazimo na zastupljenost kompozitnih materijala u primjeni predložena je njihova široka rasprostranjenost, a slikom 1. dani su statistički podaci o utrošku kompozita u svijetu po industrijskim granama i proizvodima.

Elektrotehnika: električna izolacija dijelova, izolacija od utjecaja elektromagnetnih valova, podloge sklopki, podloge tiskanih kola, oklopi, kućišta, poklopci, satelitske antene, radarske antene, kupole, vrhovi TV tornjeva, kanali za kablove, vjetrenjače.

Građevinarstvo: stambene jedinice, dimnjaci, betonske konstrukcije, različiti pokrovi (kupole, prozori), bazeni za plivanje, pročelja zgrada, profili, unutarnji zidovi, vrata, namještaj, kupaone, telefonske kabine.

Transport cestama: dijelovi karoserije, kompletne karoserije, volani, branici, rešetke hladnjaka, vratila transmisije, opruge ogibljenja, spremnici za plin, šasijske, zglobovi ogibljenja, navlake, kabine, sjedišta, autocisterne, hladnjače, prikolice.

Transport željeznicom: čeloni dijelovi lokomotiva, konstrukcijski dijelovi vagoni, vrata, sjedišta i unutarnje pregrade putničkih vagona, kućišta ventilatora, kabine žičara.

Transport morem: brodovi lebdjelice (hoverkrafti), brodovi za spašavanje, patrolni brodovi, male ribarice, ribarski brodovi, oprema za iskrcavanje, minolovci, regatne brodice, brodice za zabavu, kanui.

Zračni transport: konstrukcijski dijelovi putničkih zrakoplova, jedrilice, kupole, usmjerivači zraka, krilca, vertikalni stabilizatori, krakovi elise helikoptera, propeleri, vratila transmisije, diskovi kočnica zrakoplova, svemirske letjelice.

Svemirski transport: startne rakete, spremnici, sapnice, oplata za ulazak u atmosferu.

Opće strojarstvo: zupčanici, ležajevi, zaštitni pokrovi, tijela dizalica, ruke robota, naplatci, letve za tkanje, cijevi, dijelovi ploče za crtanje, boce za komprimirani plin, cijevi za morske platforme, radijalni pneumatsici.



Slika 1. Svjetska potrošnja kompozita po proizvodima 2005. godine [2]



Primjena kompozita u većih brodova može se sistematizirati razvrstavanjem u tri glavne kategorije:

- struktura,
- strojarstvo i
- funkcionalne komponente.

Slika 2. Brod

Struktura	Strojarstvo	Funkcionalne komponente
Nadgrađa	Cijevi	Preklopke vratila
Dimnjaci	Pumpe	Oprema za spašavanje
Temelji strojeva	Ventili	Radni stolovi
Vrata	Izmjenjivači topline	Izolacija
Grotla	Sitasti pročistači	Nestrukturni dijelovi
Upore	Ventilacijski vodovi	Filteri
Goli trup	Ventilatori	Linice
Pregrade	Osovine propelera	Nosači komunikacijske opreme
Propeleri	Tankovi	Zaštitna kućišta
Kontrolni paneli	Kućišta reduktora	
Tankovi	Kućišta motora	
Stubišta	Elektro-izolacija	
Rešetke	Stijenke kondenzatora	

Tablica 1. Primjene kompozita u brodogradnji

2. OSNOVNI KONSTITUENTI KOMPOZITA

2.1. MATRICE

Matrice mogu biti polimerne, kako duromeri tako i plastomeri, ugljične, metalne, keramičke i druge. Materijal matrice mora ispuniti više funkcija, od kojih su neke ključne za postizanje zadovoljavajućih performansi sustava:

- Objedinjava vlakna i na njih prenosi opterećenje, te osigurava oblik i krutost konstrukcije
- Izolira pojedinačna vlakna koja se ne mogu samostalno opterećivati, te se na taj način usporava širenje pukotine
- Osigurava dobru kvalitetu površine, te na taj način potiče proizvodnju dijelova u konačnom obliku ili blisko konačnom obliku
- Osigurava zaštitu ojačavajućih vlakana od kemijskih utjecaja i mehaničkih oštećivanja
- Svojom duktilnošću polimerna matrica (plastomeri) povećava žilavost kompozita
- Svojim svojstvima i kompatibilnošću s vlaknima u velikoj mjeri utječe na vid oštećenja

POLIMERNI KOMPOZITI

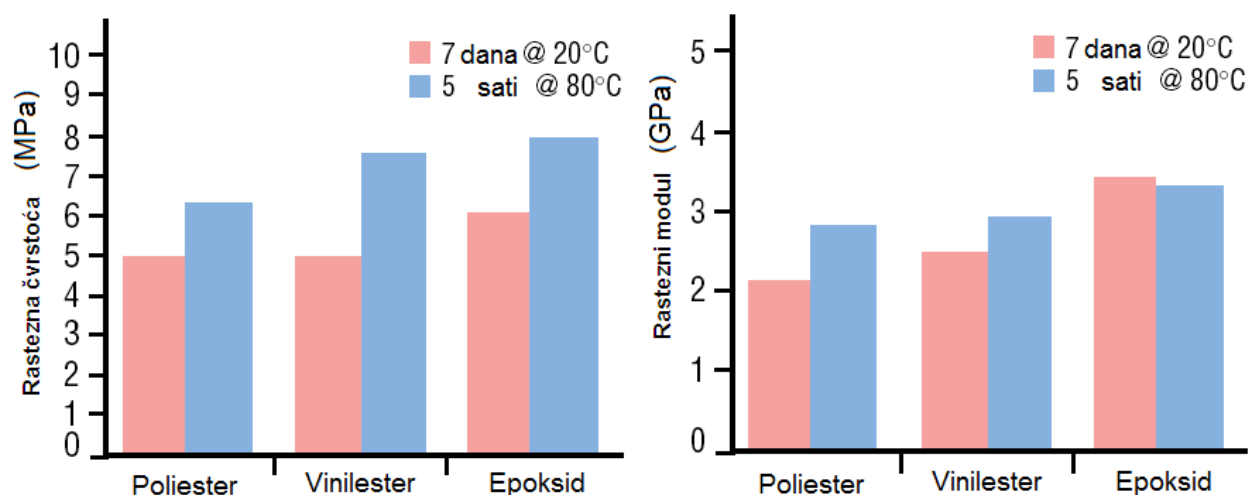
U brodogradnji su najčešće u upotrebi polimerni kompoziti. Ovi materijali imaju matricu na bazi polimernih smola, a kao ojačanja najčešće se koriste staklena, karbonska, aramidna ili druga vlakna.

Glavne karakteristike polimernih kompozita jesu:

- mala gustoća
- visoka čvrstoća
- visoka specifična čvrstoća
- visoka specifična krutost
- konstrukcijska prilagodljivost
- mogućnost orijentiranosti vlakana
- velika mogućnost kombinacije smola/vlakno
- dobra otpornost na abraziju
- visoka otpornost na koroziju
- dimenzijska stabilnost
- odlične prigušne karakteristike
- mala sposobnost prenošenja buke
- trajnost
- mali utrošak potrebne energije za proizvodnju

Najčešće se kao duromerna matrica upotrebljavaju nezasićene poliesterske smole u kombinaciji sa staklenim vlaknima i epoksi smole s ugljičnim i aramidnim (Kevlar) vlaknima. Epoksi smole imaju veću čvrstoću i rastezni modul, te niže stezanje pri otvrdnjavanju i niži koeficijent toplinskog širenja. Čvrstoća veze između matrice i vlakana također je veća za epoksi smole. Međutim, njihov je nedostatak viša viskoznost u tekućem stanju i znatno su skuplje. Jedna od karakteristika duromernih smola je krhkost. Dva važna mehanička svojstva smole su rastezna čvrstoća i krutost.

Slika 3. pokazuje kako epoksidne smole imaju najbolja mehanička svojstva. Iz dijagrama se može vidjeti i da dodatna polimerizacija pri 80 °C djeluje na sve smole u smislu povećavanja rastezne čvrstoće i rasteznog modula, osim na epoksidne smole, gdje se dodatnom polimerizacijom rastezni modul smanjuje.

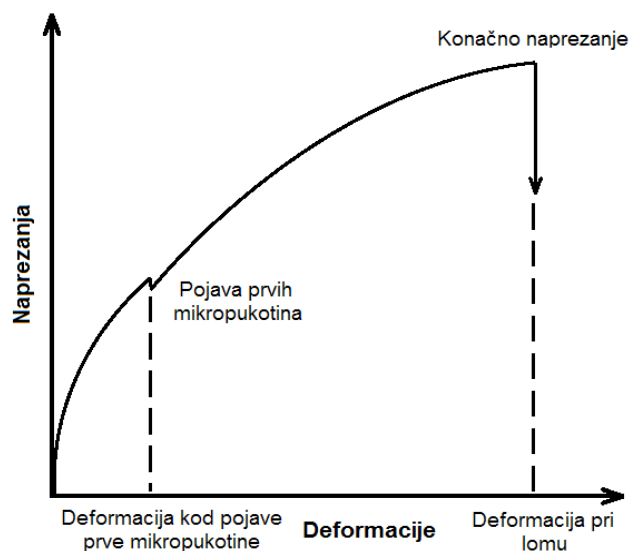


Slika 3. Rastezna čvrstoća i rastezni modul različitih vrsta smola

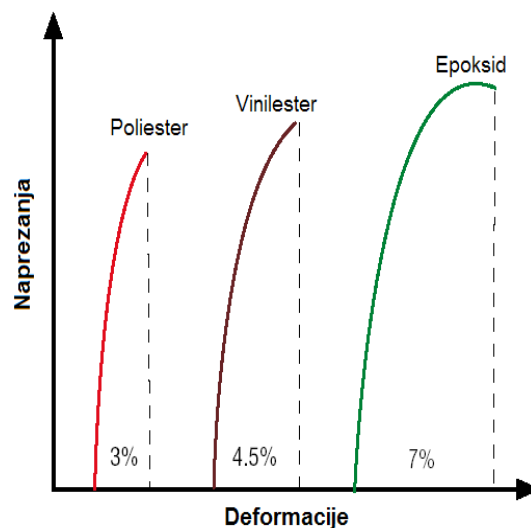
Što se tiče lomova kompozitnih materijala može se vidjeti da će prije potpunog sloma kompozitnog materijala naprezanje postići razinu kod koje dolazi do pojave sitnih pukotina smole koje se šire duž vlakana koja nisu u ravnini sa opterećenjem. To su takozvane poprečne mikropukotine i njihovom pojavom započinje proces pucanja.

Kompozitni materijali trebaju biti tako projektirani da naprezanja u njima nikada ne prelaze naprezanja kod kojih se javljaju mikropukotine.

Slika 4. prikazuje da su deformacije kod kojih se javljaju mikropukotine puno manje od deformacija pri lomu.



Slika 4. Tipična krivulja odnosa naprezanja i deformacije za kompozitni material

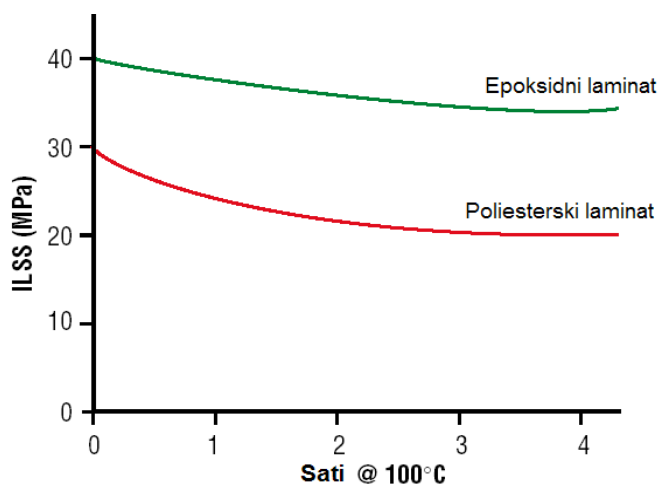


Slika 5. Usporedba deformacija različitih vrsta smola

Budući da granična čvrstoća kompozita ovisi o graničnoj čvrstoći vlakana, ove mikropukotine ne smanjuju odmah granična svojstva materijala. Pa ipak u medijima kao što su voda i more laminat s mikropukotinama apsorbirat će puno više vode od neoštećenog laminata. To dovodi do povećanja težine konstrukcije, hidrolize smole, gubitka krutosti i konačno do pada graničnih svojstava.

Mikropukotine se spriječavaju povećanjem adhezije između vlakana i smole. To se postiže odgovarajućim kemijskim sastavom smole i njenom kompatibilnošću s površinskim kemijskim premazima vlakana. Odlična adhezivna svojstva epoksidnih smola omogućuju im da postignu veće deformacije do pojave prvih mikropukotina. Slikom 5. prikazan je odnos naprezanja i deformacije do loma za sve tri vrste smola.

Sve smole bubre kada su izložene djelovanju vode. Epoksidne smole su otpornije na bubrenje od poliesterskih i vinilesterskih zahvaljujući svojoj kemijskoj građi. Tako će tanki poliesterski laminat uronjen u vodu na period od jedne godine zadržati samo 65% svoje interlaminarne smične čvrstoće (ILSS), dok će epoksidni laminat uronjen u vodu na isti period zadržati oko 90% ILSS-a. Slika 6. Pokazuje djelovanje vode na poliesterski i epoksidni laminat uronjen u vodu pri 100 °C. Povišena temperatura ubrzava bubrenje laminata.



Slika 6. Interlaminarna čvrstoća laminata

U sljedećoj tablici uspoređene su neke osnovne karakteristike najčešće korištenih matrica.

SVOJSTVO		EPOKSI SMOLA	POLIESTERSKA SMOLA
Gustoća	[g/cm ³]	1,1-1,4	1,2-1,5
Poissonov koeficijent	-	0,38-0,4	0,37-0,39
Vlačna čvrstoća	[MN/m ²]	35-100	40-90
Modul vlaka	[GN/m ²]	2,0-6,0	2,5-3,5
Savojna čvrstoća	[MN/m ²]	–	80-140
Savojni modul	[GN/m ²]	–	3,5-4,0
Tlačna čvrstoća	[MN/m ²]	100-200	90-250
Prekidno istezanje	[%]	1,0-6,0	2
Toplinska provodnost	[W/m°C]	0,1	0,2
Koef. toplinskog širenja	[10 ⁻⁶ /°C]	60	100-200
Temperatura razaranja	[°C]	50-300	50-110
Stezanje pri otvrdnjavanju	[%]	1,0-2,0	1,0-8,0
Upijanje vode, 24 h na 20 °C	[%]	0,1-0,4	0,1-0,3

Tablica 2. Osnovne karakteristike pojedinih vrsta smola

METALNI KOMPOZITI

Prednosti:

- vrlo visoka čvrstoća i krutost uz vrlo malu gustoću,
- visoka toplinska i električna vodljivost i niska toplinska rastezljivost,
- vrlo dobra otpornost na trošenje,
- vrlo dobra svojstva na visokim temperaturama.

Nedostaci:

- komplicirana proizvodnja,
- vrlo visoka cijena ,
- nedovoljno podataka o svojstvima materijala,
- još uvijek nema dovoljno smjernica za konstruiranje s ovom vrstom materijala,
- loša recikličnost.

Tablicom 3. prikazan je pregled osnovnih svojstava nekih metalnih kompozita.

Vlakno	Matrica	Volumni udio vlakna, %	Gustoća, kg/m ³	Uzdužni rastezni modul kN/mm ²	Uzdužna rastezna čvrstoća N/mm ²
Ugljično vlakno	Al-legura 6061	41	2440	320	620
Vlakno bora		48	-	207	1515
SiC		50	2930	230	1480
Al ₂ O ₃	Al-legura 380.0	24	-	120	340
Ugljično vlakno	Mg-legura AZ31	38	1830	300	510
"Borsic"	Titan	45	3680	220	1270

Tablica 3. Usporedba svojstava najčešće korišteni metalnih kompozita

KERAMIČKI KOMPOZITI

Prednosti:

- stabilnost na ekstremno visokim temperaturama,
- otpornost na toplinski šok,
- iznimna otpornost na koroziju,
- velika tvrdoća,
- mala masa.

Nedostaci:

- sklonost krhkom lomu (keramička matrica + keramička ojačanja)
- visoka cijena i komplicirana tehnologija izrade

U sljedećoj tablici konkretnim brojčanim vrijednostima predložena su neka mehanička svojstva keramičkog kompozita silicij karbidne matrice i silicij karbinih vlakana.

Gustoća [kg/m ³]	2100
Tlačna čvrstoća [MPa]	450
Rastezna čvrstoća [MPa]	262
Smična čvrstoća [MPa]	34
Rastezni modul [GPa]	96
Toplinska vodljivost [10 ⁻⁶ /K]	2,7
Toplinska rastezljivost [W/mK]	1,32

Tablica 4. Neka svojstva keramičko kompozita sa SiC matricom ojačanog s kontinuiranim SiC vlaknima

Nakon kratkog pregleda karakteristika kompozita klasificiranih prema vrsti matrice tablicom 5. predložili smo svojstva materijala matrica i paralelno ih usporedili.

Svojstva	Metali	Polimeri	Keramike
Gustoća (Mgm^{-3})	2-16	1-2	2-17
Talište ($^{\circ}\text{C}$)	200-3500	70-200	2000-4000
Toplinska provodljivost	visoka	niska	srednja
Toplinska rastezljivost	srednja	visoka	niska
Specifični toplinski kapacitet	nizak	srednji	visok
Električna provodljivost	visoka	vrlo niska	vrlo niska
Rastezna čvrstoća (Mpa)	100-2500	30-300	10-400
Rastezni modul (Gpa)	40-400	0.7-3.5	150-450
Tvrdoća	srednja	niska	visoka
Otpornost na koroziju	srednja-slaba	dobra-srednja	dobra

Tablica 5. Usporedba svojstava materijala matrica

2.2. OJAČALA

Kompozite možemo sistematizirati i prema dodatku, odnosno, ojačalu.

KOMPOZITI S ČESTICAMA

Na svojstva ovih kompozita utječu:

- Veličina čestica
- Volumni udio
- Razmak između čestica

Prema veličini čestica u kompozitu razlikujemo kompozite s dispergiranim malim česticama i kompozite s dodatkom velikih čestica. Orjentaciono, male čestice podrazumijevaju veličinu promjera do 0,1 μm , a velike promjer veći od 1 μm .

Kompoziti s dispergiranim dodacima

Dodate čestice ometaju gibanje dislokacija, odnosno ojačavaju matricu. Promjeri dispergiranih čestica iznose 10 ÷ 250 nm, a njihov učinak ovisi o veličini čestica (d_p) i razmaku među njima (D_p) .

Kompoziti s dodatkom velikih čestica

Kompoziti koji sadrže veliku količinu velikih čestica ne mogu efektivno spriječiti blokiranje klizanja. Oni su proizvedeni s prvenstvenom namjerom stvaranja raznih specijalnih svojstava, prije nego li samo povećanje čvrstoće materijala.

Tvrđi metal sadrže tvrde keramičke čestice disperzirane u metalnoj matrici. Okretne pločice od volframovog karbida, koje se koriste u alatima za obradu odvajanjem čestica su karakteristične za ovu grupu.

Abrazivi : brusne i rezne ploče se proizvode iz aluminijevog oksida (Al_2O_3), silicij karbida (SiC) i kubičnog bor nitrida (BN). Kako bi se povećala žilavost koristi se stakleno ili polimerno vezivo. Kod dijamantnih abraziva se kao vezivo u pravilu koristi metalna matrica.

Električni kontakti : Materijali koji se koriste za električne kontakte u sklopkama i relejima moraju imati dobru kombinaciju električne vodljivosti i otpornosti na trošenje. Bez tih svojstava, kontakti erodiraju čime se ostvaruje slab kontakt i iskrenje. Srebro pojačano s volframovim karbidom posjeduje ovu kombinaciju svojstava.

Polimerni kompoziti : Mnogi tehnički, polimerni kompoziti, koji sadrže čestice, imaju različite dodatke. Punila mogu očvrnuti polimer, povećati tvrdoću i otpornost na trošenje, povećati toplinsku vodljivost, poboljšati otpornost na skupljanje, ali ipak, čvrstoća i žilavost se smanjuje. Kao punila se koriste: kalcijev karbonat, masivne staklene kuglice i različite gline. Čestice elastomera se dodaju polimerima kako bi se povećala žilavost. Polietilen koji sadrži metalni puder, kao što je olovo, povećava apsorpciju fuzijskih produkata, a koristi se u nuklearnim programima.

Metalni matrični kompoziti s česticama : Metalni kompoziti s česticama se dobivaju umetanjem tvrdih ali lomljivih čestica u mekšu i žilaviju matricu. Najveća pažnja posvećena je aluminij lijevačkim matricama, ali i titan, željezo, i magnezij baznim slitinama. Najčešće čestice su silicij karbi ili aluminij oksid.

KOMPOZITI OJAČANI VLAKNIMA

Vrste ojačala:

Viskeri su vrlo maleni monokristali koji imaju mnogo manji promjer u odnosu na duljinu, a mogu biti izrađeni iz grafita (ugljika) te tvrdih tehničkih keramičkih materijala; silicij karbida, silicij nitrida i aluminij oksida, koji se dobivaju posebnim postupcima.

Vlakna koja najčešće susrećemo jesu polimerna i keramička, koja mogu biti polikristalna ili amorfna.

Žica za razliku od vlakna, a posebice viskera, ima relativno velik promjer. Materijali od kojih se izrađuje najčešće su čelik, molibden, volfram. Koristi se u proizvodnji automobilskih guma, cijevi itd.

Materijal	$\rho/\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	$E/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$R_m/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$(E/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(R_m/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Viskeri					
grafit, C	2,2	700	20,7	318	9,41
silicij-nitrid, Si_3N_4	3,2	350÷380	5÷7	109÷118	1,56÷2,2
aluminij-oksidi, Al_2O_3	4,0	700÷1500	10÷20	175÷375	2,5÷5,0
silicij-karbid, SiC	3,2	480	20	150	6,25
Vlakna					
aluminij-oksidi	3,95	379	1,38	96	0,35
aramid (Kevlar 49)	1,44	131	3,6÷4,1	91	2,5÷2,85
ugljik	1,78÷2,15	228÷724	1,5÷4,8	106÷407	0,70÷2,70
E-staklo	2,58	72,5	3,45	28	1,34
bor	2,57	400	3,6	156	1,40
silicij-karbid	3,0	400	3,9	133	1,30
PE-UHMW (Spektra 900)	0,97	117	2,6	121	2,68
Metalna žica					
visoko-čvrsti čelik	7,9	210	2,39	26,6	0,30
molibden	10,2	324	2,2	31,8	0,22
volfram	19,3	407	2,89	21,1	0,15

Tablica 6. Karakteristike najčešće korištenih vlakana

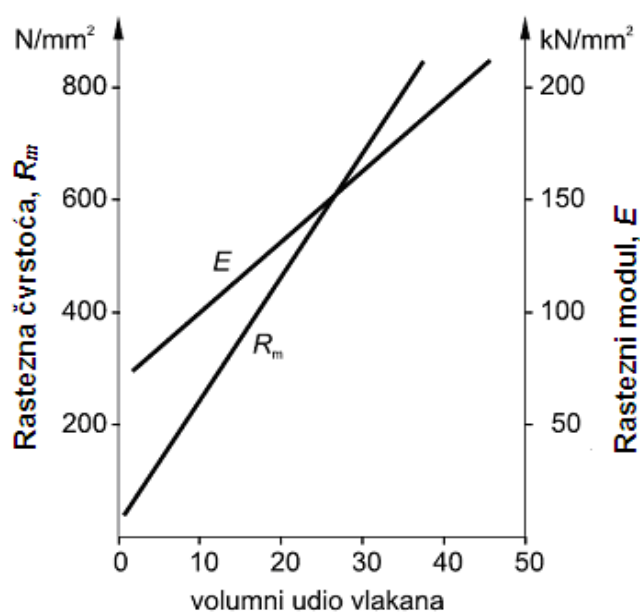
Osnovni zadaci vlakana su :

- Prihvat opterećenja – kod konstrukcijskih kompozita vlakna nose 70 – 90 % opterećenja,
- Osiguranje čvrstoće, krutosti i toplinske stabilnosti,
- Osiguranje električne vodljivosti ili izolacije, ovisno o namjeni kompozita.

Na svojstva vlaknima ojačanih kompozita utječe:

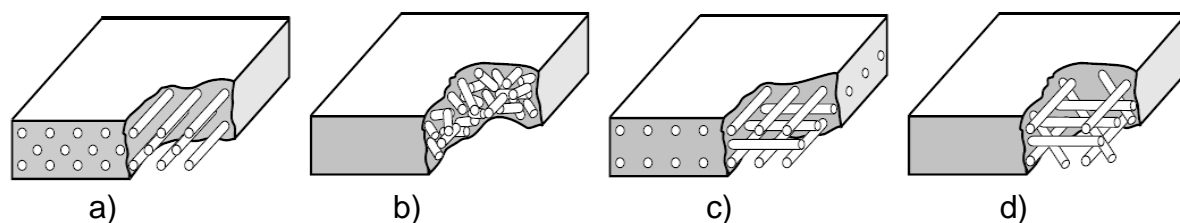
- Omjer, duljina, promjer vlakana,
- Volumni udio vlakana,
- Usmjerenost (raspored) vlakana,
- Svojstva vlakana,
- Svojstva matrice.

Volumni udio vlakna u kompozitu uvelike utječe na njegova svojstva, a tu smo ovisnost prikazali slikom 7.



Slika 7. Utjecaj udjela vlakana na rasteznu čvrstoću i rastezni modul kompozita.[2]

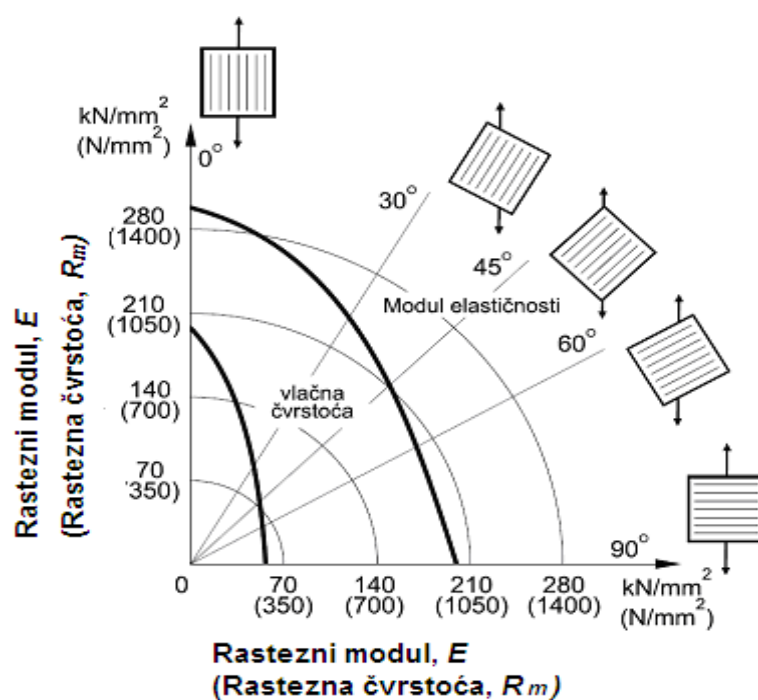
Usmjerenost, odnosno orijentacija vlakana također je bitna stavka u formiranju željenih svojstava kompozita. Moguće varijante usmjerenosti vlakana prikazane su slikom 8.



Slika 8. Raspored vlaknastih ojačala u kompozitu:

- a) kontinuirana jednosmjerna vlakna,
- b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna,
- c) ortogonalno raspoređena vlakna,
- d) višesmjerno usmjerena vlakna

Sljedećim dijagramom predložili smo utjecaj smjera opterećenja obzirom na orijentaciju vlakana u kompozitu na rasteznu čvrstoću i rastezni modul.



Slika 9. Utjecaj smjera opterećenja na rasteznu čvrstoću i rastezni modul. [2]

Općenito vlakna mogu biti:

- Prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.)
- Staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo)
- Poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.)
- Aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.)
- Ugljična vlakna (Carbon)
- Keramička vlakna
- Metalna vlakna (žica ili žičano pletivo)

Staklena vlakna

Staklena vlakna su najviše upotrebljavana ojačala za plastomerne i duromerne kompozite i čine oko 90 % svih vlakana koji se primjenjuju u polimernim kompozitima. Promjer vlakana je 3-20 μ m.

Glavne prednosti upotrebe staklenih ojačanja su:

- visok omjer čvrstoća/težina (dobra specifična čvrstoća),
- dimenzijska stabilnost,
- dobra kemijska postojanost,
- postojanost na povišenoj temperaturi
- otpornost koroziji,
- dobra električna svojstva, te
- relativno jednostavna proizvodnja, a s tim u vezi i
- niska cijena.

	E staklo	S staklo
silicij dioksid	52 - 56 %	64 - 56 %
kacij oksid	16 - 25 %	0 - 0,3 %
aluminij oksid	12 - 16 %	24 - 26 %
bor oksid	5 - 10 %	-
natrij & kalij oksid	0 - 2 %	0 - 0,3 %
magnezij oksid	0 - 5 %	9 - 11 %
željezo oksid	0,05 - 0,4 %	0 - 0,3 %
titan oksid	0 - 0,8 %	-
fluoridi	0 - 1%	-

Sastav i omjer sastavnih komponenata pojedinih staklenih vlakana formiraju i određuju njihova svojstva.

Tablica 7. Sastav staklenih vlakna

E-staklo odlikuje dobra čvrstoća te otpornost na utjecaj morske vode, što je od velikog značaja za primjenu ovog vlakna u brodogradnji.

S-staklo je čvrstoće za 30% veće od E-stakla, bolje dinamička izdržljivost, ali je ujedno i 3 do 4 puta skuplje od E stakla (2-3 \$/kg).

C- staklo, **T-staklo** viših su rasteznih čvrstoća i rasteznih modula, ali i značajnije skuplji (15-30\$/kg).

Aramidna vlakna

Najpoznatija i najprimjenjivanija aramidna vlakna jesu Kevlar 49(29, 149...), Twaron, itd. Svaka vrsta ima svoja specifična svojstva, ali jedno im je zajedničko, a to je velika rastezna čvrstoća. Odlikuju se najvišom specifičnom čvrstoćom od svih komercijalno dostupnih ojačala. Značajna svojstvo su im krutost, dinamička izdržljivost, otpornost na abraziju, dobra kemijska i toplinska postojanost. Nisu krhka pa su povoljna za izradu tkanina. U kombinaciji s fenolnim smolama koriste se u zrakoplovstvu. Degradacija kod UV zračenja je relativno spora. Nedostaci ovih vlakana su lošija tlačna čvrstoća od staklenih i ugljičnih vlakana, slaba adhezija sa matricom, visoka higroskopnost i puno viša cijena od staklenih vlakana (20-40\$/kg).

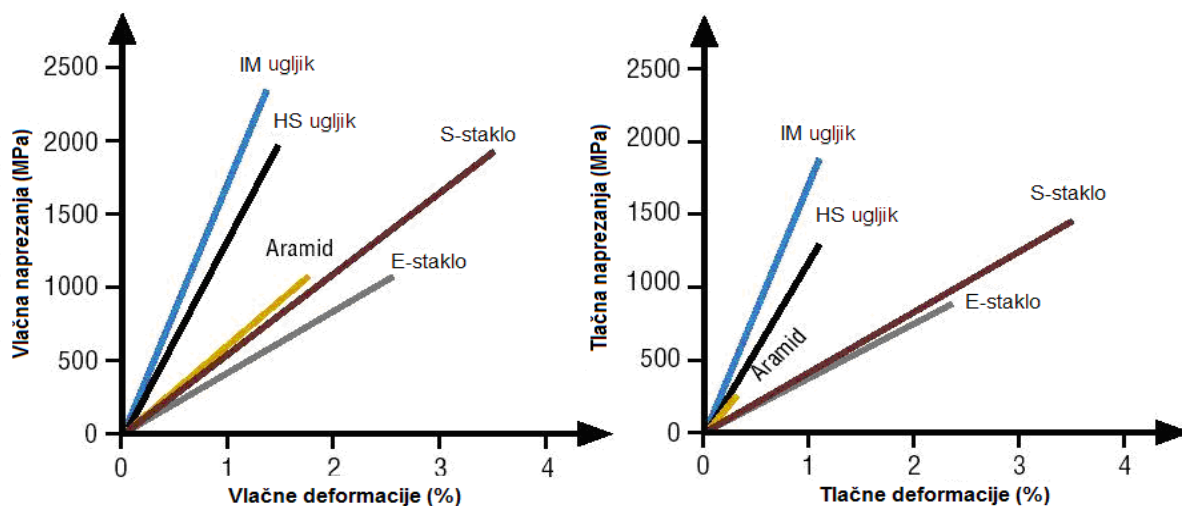
Ugljična vlakna

Potražnja za ovim vlaknima je oko 20.000 t/god od čega 30% otpada na avioindustriju. Promjer vlakana je 8-10 μ m, a razlikujemo kontinuirana i rezana. U odnosu na Al 6061 imaju 7 puta veću rasteznu čvrstoću, 2 puta veću krutost, a ujedno 1,5 puta manju gustoću. Imaju najviši specifični modul i visoku specifičnu čvrstoću. Toplinska vodljivost im je 3 puta bolja nego kod bakra. S odgovarajućom matricom formiraju kompozit izvrsne korozijske postojanosti. Žilavost im je slabija nego kod staklenih ili aramidnih vlakana. Cijene im se kreću od 50 pa do 1000 \$/kg: standardni modul (220GPa; 50 \$/kg); srednji modul (240GPa; 80 \$/kg); visoki modul (300GPa; 150 \$/kg), ultravisoki modul (450GPa; 1000 \$/kg).

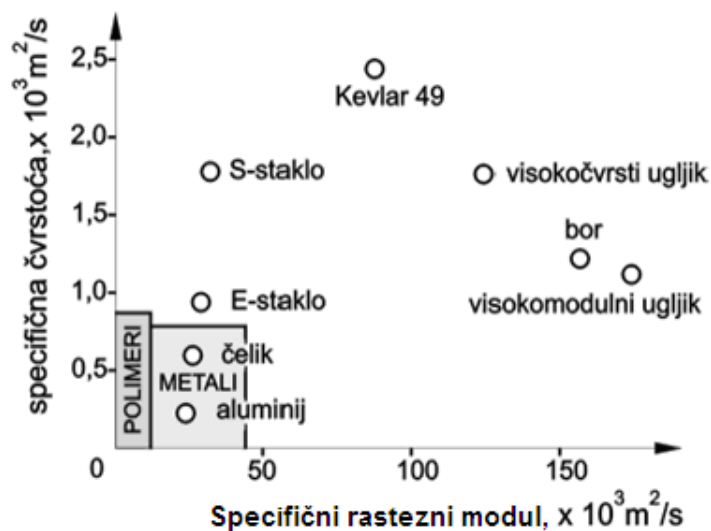
Keramička vlakna

Uglavnom se koriste u kompozitima čija je glavna karakteristika otpornost na visoke temperature (preko 1000°C), veoma često su to metalni kompoziti.

Dijagramima na slici 10. prikazana je otpornost materijala, i kompozita na njihovoj bazi, na deformaciju s obzirom na vrstu opterećenja. Nagib svake krivulje predstavlja krutost pojedinog materijala. Što je krivulja strmija to je veća i njezina krutost. Može se vidjeti i da se skoro svi materijali, osim aramida, ponašaju jednako pri tlačnim i vlačnim opterećenjima.



Slika 10. Odnosi naprezanja i deformacija različitih vrsta vlakana

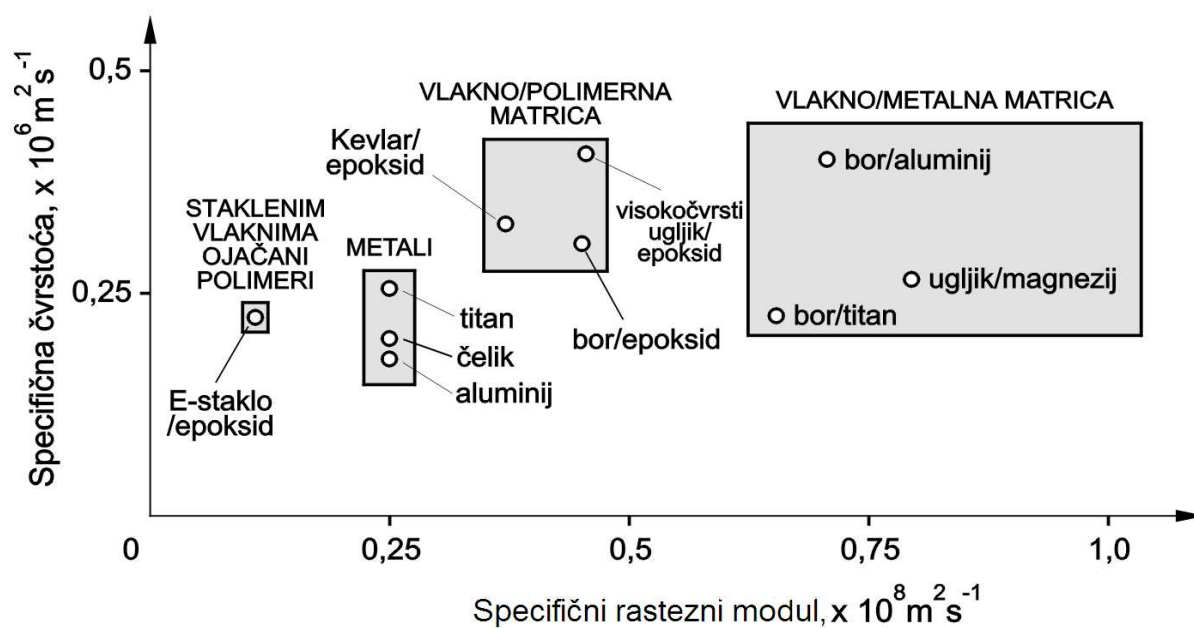


Slika 11. Usporedba specifičnog rasteznog modula i specifične čvrstoće najčešće korištenih vlakana

Tabličnim prikazom naveli smo prednosti i nedostatke najzastupljenijih vlakana.

Ojačalo	Prednosti	Nedostaci
E-staklo, S-staklo	Specifična čvrstoća, cijena	Krutost, dinamička izdržljivost
Aramidna vlakna	Specifična čvrstoća	Tlačna čvrstoća, upijanje vlage
HS (visokočvrsta) ugljična	Specifična čvrstoća, krutost	Cijena
UHM (ultravisoko modulna) ugljična	Izuzetno visoka krutost	Čvrstoća, cijena

Tablica 8. Neke prednosti i nedostaci vlaknastih ojačala



Slika 12. Usporedba specifičnog rasteznog modula i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita

STRUKTURNI KOMPOZITI

Sendvič kompoziti

Sendvič strukture su specifični materijali, koji sadrže tanke slojeve obložnog materijala vezanog uz neki materijal male gustoće (kao što je polimerna pjena). Obložni materijal i materijal za punjenje nemaju čvrstoću i krutost sendvič materijala, odnosno svojstva ovog kompozita ne ovise o svojstvima matrice i ojačala već i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Jezgra primarno osigurava krutost i otpornost na smik, a materijal koji se najčešće koristi u tu svrhu jesu:

- pjene (PVC, PS, PU, PEI polietierimid, akrilne pjene)
- saće (Al, Nomex – aramid, ABS, Polikarbonat, PP, PE)
- drvo (balza, cedar)

Slojeviti kompoziti

Slojeviti kompoziti su formirani od slojeva različitih vrsta, karakteristika i debljina. U slojevite kompozite spadaju: različiti tanki slojevi, deblje zaštitne površine, obloge, bimetali, laminati i dr. Mnogi slojeviti kompoziti su konstruirani radi:

- povećanja otpornosti na koroziju,
- niske cijene,
- velike čvrstoće i
- male težine.

Najčešće se susreću površinski slojevi kojima se osiguravaju željena svojstva površina dijelova/sustava (tvrdoća, otpornost na trošenje, abraziju i koroziju, poboljšanje izgleda) koja nema osnovni materijal.

Stanični kompoziti

Staničnu (ćelijsku) strukturu formiraju sjedinjene ćelije s tankim krutim stjenkama (matrica), ispunjene plinom (dodatak). Ćelije mogu biti otvorene i zatvorene.

Keramičke pjene

Poroznost je keramičkih pjena $75 \div 90 \%$, te su niske gustoće i toplinske vodljivosti, velike specifične površine i specifične čvrstoće, te velike kemijske i toplinske otpornosti. Primjenjuju se za izradu konstrukcijskih dijelova letjelica, filtara izloženih djelovanju agresivnih kemikalija i/ili visokih temperatura, podloga za katalizatore.

Metalne pjene

Poroznost je metalnih pjena $40 \div 90 \%$. Najviše se koriste aluminijske pjene niske gustoće i toplinske vodljivosti, visoke krutosti. Dobro prigušuju vibracije i zvukove. Koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova vozila i letjelica.

Polimerne pjene

Polimerne pjene s otvorenim ćelijama su fleksibilne, a pjene sa zatvorenim ćelijama krute. Karakteristično su im niska gustoća i toplinska vodljivost.

3. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA

Ukupno ponašanje i svojstva kompozita ovise i o metodama njihove proizvodnje od kojih su najčešće ručno polaganje, naštrcavanje, pultrudiranje, ubrizgavanje smole u kalup, namatanje, prepreg.

RUČNO POLAGANJE

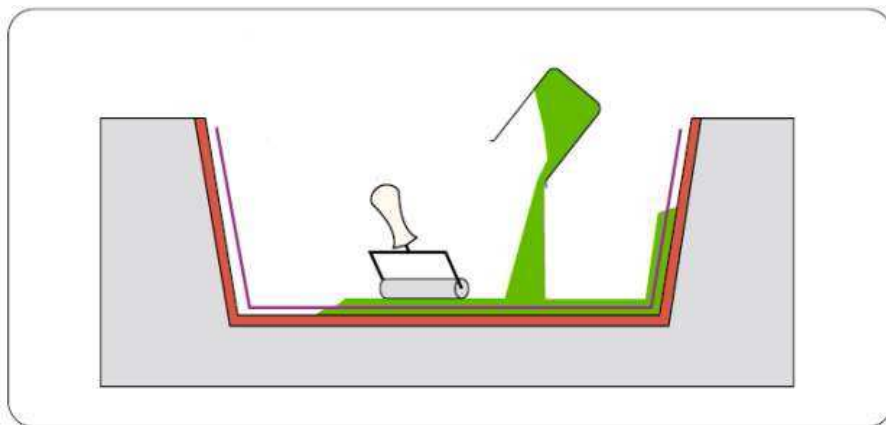
Vlakna povezana u tkanja različitog oblika stavljaju se u kalup. Na njih se nanosi smola koja se impregnira u ojačanja pomoću valjaka ili kistova. Do skrućivanja dolazi pri atmosferskim uvjetima.

Prednosti:

- vrlo jednostavan postupak koji je poznat već dulje vrijeme,
- malen trošak izrade alata,
- veliki izbor vrsti materijala i dobavljača,
- udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrcavanjem.

Nedostaci:

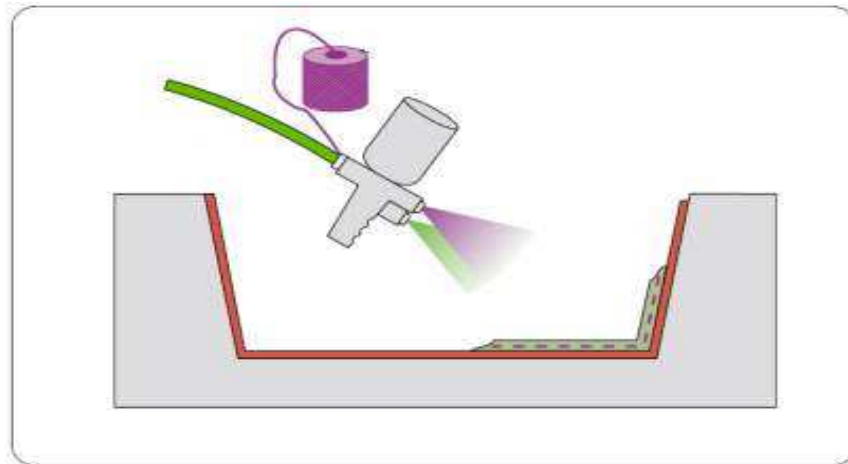
- kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o umješnosti radnika. Teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina.
- smole koje se ručno polažu obično imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetnije od proizvoda s većom molekularnom masom,
- koriste se smole male viskoznosti što loše utječe na mehanička svojstva.



Slika 13. Ručno polaganje

NAŠTRCAVANJE

Vlakno ulazi u ručni pištolj u kojem se sječe na manje komadiće i dodaje u struju zraka i tekuće smole. Takva se mješavina naštrcava u kalup gdje se i skrućuje u atmosferskim uvjetima. Kao materijal matrice se uglavnom koriste poliesteri, dok se za ojačanje koriste isključivo staklena vlakna.



Slika 14. Naštrcavanje

Prednosti:

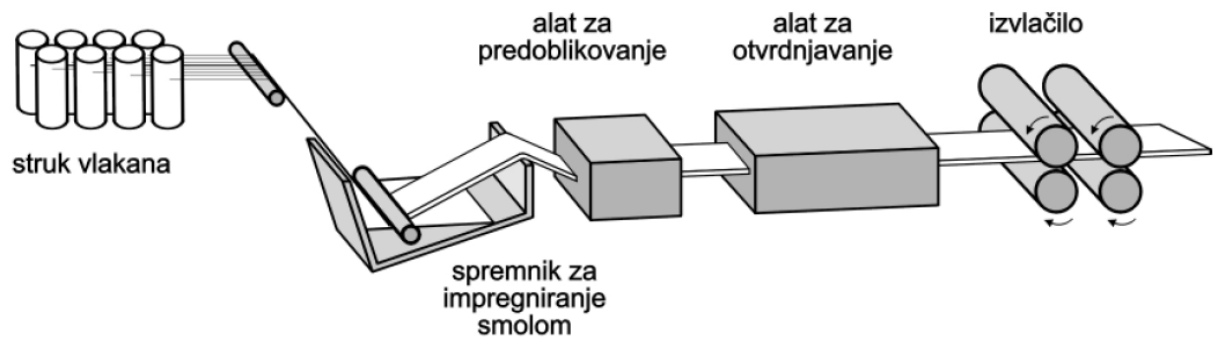
- široka primjena postupka poznata duže vrijeme,
- jeftin i brz način taloženja vlakna i smole,
- mali trošak izrade alata.

Nedostaci:

- sadrže nešto veću količinu smole tako da imaju veću masu,
- za ojačanja se koriste samo kratka i sječena vlakna, tako da konačni proizvod ima ograničena mehanička svojstva,
- smole moraju imati malu viskoznost kako bi se mogle naštrcavati, što negativno utječe na mehanička i toplinska svojstva.

PULTRUDIRANJE

Suhi struk vlakana ili tkanina provlači se kroz kupelj katalizirane smole.



Slika 15. Pultrudiranje

Prednosti:

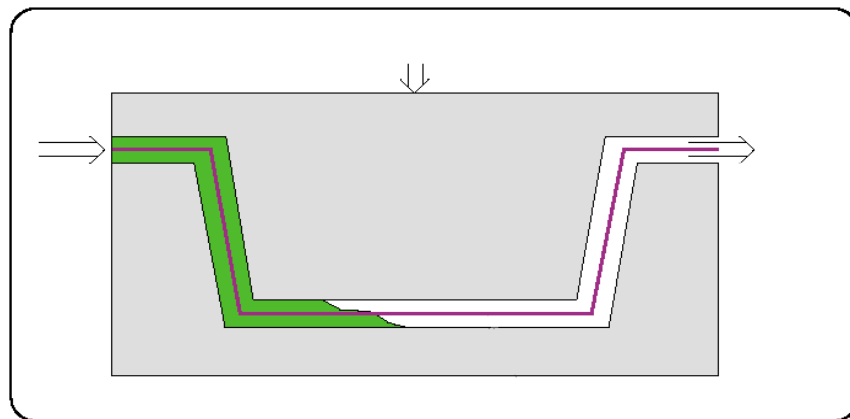
- brz, ekonomičan postupak
- homogen materijal s ujednačenim presjekom
- komplicirani profili
- moguće korištenje hibridnih ojačala

Nedostaci:

- anizotropnost
- visoka cijena alata kod kompliciranih profila, te relativno visoka ulaganja u strojeve

UBRIZGAVANJE SMOLE U KALUP

Predoblik od vlakana se postavlja u kalup (mogu se stvoriti različiti oblici koji se drže vezivom). Kalup se zatvara te se u njega ubrizgava smola (može se koristiti i vakuum). Nakon što je kalup popunjen zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana smola i dolazi do skrućivanja na povišenim ili sobnim temperaturama. Mogu se koristiti gotovo sve vrste matrica i vlakana.



Slika 16. Ubrizgavanje smole u kalup

Prednosti:

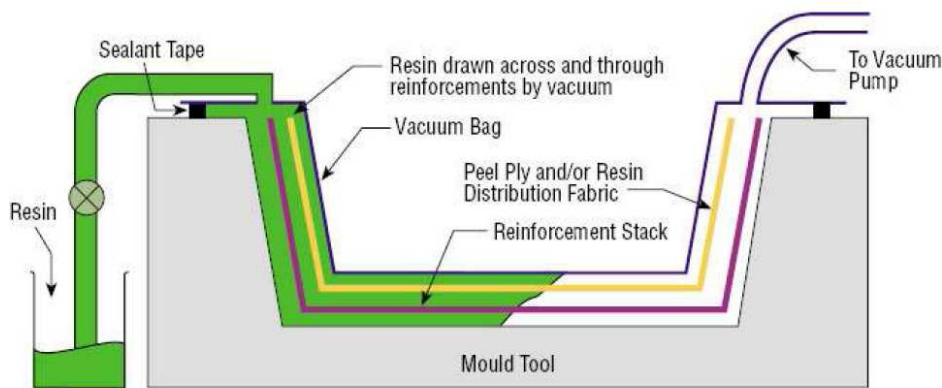
- proizvodnja kompozita s visokim udjelom vlakana i s niskim udjelom pukotina u materijalu,
- budući da je smola zatvorena u kalup, ne predstavlja opasnost za okolinu,
- kvalitetan izgled površine.

Nedostaci:

- skup i kompliciran alat i priprema,
- proizvodnja je ograničena na manje komade,
- mogu se pojaviti mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom, što može dovesti do velikog otpada.

DRUGI PROCESI UBRIZGAVANJA – SCRIMP, RIFT, VARM itd.

Tkanja se polažu u kalup, a na njih se stavlja površinski pokrov i pletivo. Pomoću vakuum pumpe se uklanja zrak, a zatim slijedi ubrizgavanje smole. Pletivo olakšava protok smole i vlaženje ojačanja. Matrice su najčešće epoksidne smole, poliesteri i vinil esteri. Kao ojačanja mogu poslužiti sve vrste vlakana.



Slika 17. Proces ubrizgavanja

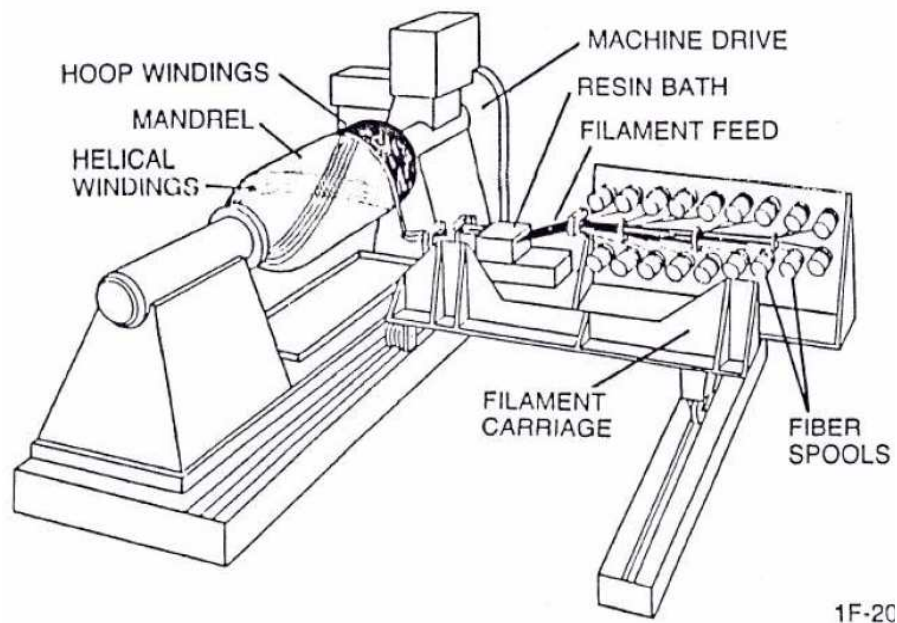
Prednosti:

- mnogo manji trošak izrade alat, budući da kao gornji dio kalupa služi pokrov iz kojeg se isisava zrak,
- moguća je proizvodnja dijelova velikih dimenzija,
- moguće je i korištenje alata koji se inače primjenjuju u postupku ručnog polaganja.

Nedostaci:

- izvođenje procesa je relativno složeno,
- moraju se koristiti smole male viskoznosti,
- moguća je pojava lokaliteta u koje nije impregnirana smola .

NAMATANJE



Slika 18. Namatanje

Prednosti:

- vrlo brza i ekonomična metoda,
- može se regulirati udio smole na vlaknima,
- troškovi su manji zbog toga što se rabe pojedinačna vlakna, a ne tkanja,
- mogu se dobiti odlična mehanička svojstva kompozita ako se vlakna poslažu u smjeru djelovanja opterećenja.

Nedostaci:

- oblici proizvoda koji se dobivaju su ograničeni (konveksni),
- smještaj vlakana na različite oblike nije uvijek lagan (npr. uzdužno) ,
- troškovi dijela na koju se namotava mogu biti visoki u slučaju izrade velikih dijelova,
- vanjska površina proizvoda nije uvijek estetski prihvatljiva.

PREPREG

Različita vlakna ili tkanja se predimpregniraju sa smolom. Tako dobiveni oblici se najčešće zamrzavaju kako bi se mogli skladištiti dulje vrijeme. Smola koja se koristi nije potpuno u krutom stanju tako da je prepreg na dodir malo ljepljiv. Nakon toga se preprezi strojno polažu u kalup, vakuumski se pakiraju i zagrijavaju na temperaturu 120-180°C. Uz kemijske dodatke moguće je sniziti temperaturu skrućivanja na 60-100°C. Ako je za stvaranje kompozita potreban nešto viši tlak sve se to stavlja u autoklavu kojom je moguće postići tlakove do 5 atmosfera. Matrice koje se koriste jesu epoksidne smole, poliesteri, fenoli i visokotemperaturni plastomeri kao što su npr. poliimidi.

Prednosti:

- moguće je vrlo precizno podešavanje udjela vlakana i smole,
- materijali su potpuno ekološki prihvatljivi,
- moguće je impregniranje i smola visoke viskoznost čime se značajno utječe na mehanička i toplinska svojstva kompozita,
- moguća je automatizacija cijelog procesa.

Nedostaci:

- troškovi materijala su veći,
- materijal se skrućuje u autoklavama koje su prilično skupe i ograničenih su dimenzija,
- proces se odvija na povišenim temperaturama tako da i to treba uzeti u obzir prilikom izbora materijala alata.

4. ZAKON MIJEŠANJA

Od njihova početka, ponašanje kompozitnih materijala se predviđalo na osnovi proračuna strukture između vlakna i matrice. Faktori kao sastav konstituenta, fizikalna morfologija i geometrijski raspored su uključeni u model za predviđanje mehaničkih svojstava. Zakonom miješanja se kod kompozita s velikim česticama npr. predviđa gustoća, i to sljedećim izrazom:

$$\rho_c = \sum V_i \cdot \rho_i$$

gdje su:

ρ_c – gustoća kompozita,

ρ_i – gustoća konstituenta

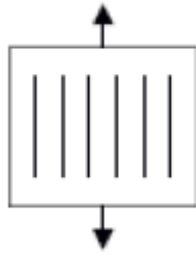
V_i – volumni udio konstituenta.

Neka svojstva, kao npr. tvrdoća i čvrstoća ne mogu se predvidjeti primjenom zakona miješanja. Zakonom miješanja uvijek se može predvidjeti gustoća vlaknima ojačanih kompozita:

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f$$

Gdje se indeks „m“ odnosi na matricu, a „f“ na vlakno.

Osim toga, s pomoću zakona miješanja može se točno predvidjeti električna i toplinska vodljivost vlaknima ojačanog materijala u smjeru vlakana, ako su vlakna kontinuirana i jednosmjerna. Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, zakonom miješanja može se točno predvidjeti rastezni modul:



$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f$$

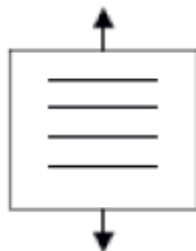
gdje je :

E_c – rastezni modul kompozita,

E_m – rastezni modul matrice,

E_f – rastezni modul vlakna.

U slučaju kada opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj. Rastezni modul može se predvidjeti izrazom:



$$E_c = \frac{E_m \cdot V_m}{E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f}$$

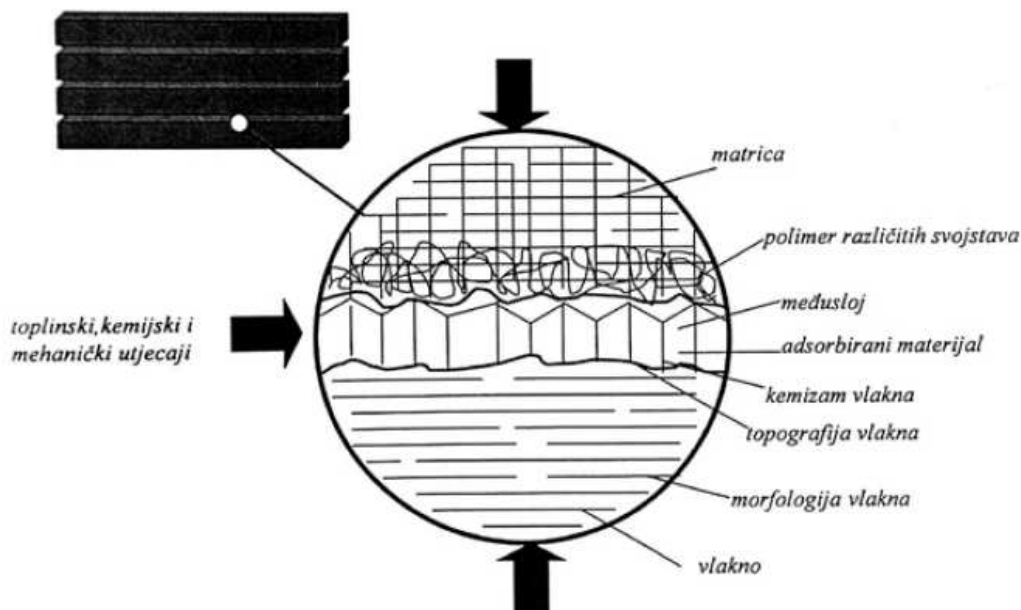
Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja. Druga svojstva, kao npr. duktilnost (plastičnost), ponašanje pri udaru (žilavost), ponašanje pri dinamičkom (umor materijala) i dugotrajnom statičkom opterećenju (puzanje materijala) predviđaju se teže nego rastezna čvrstoća.

5. MEĐUPOVRŠINE I MEĐUSLOJEVI

Granični međusloj između vlakna i osnove

Granična površina između vlakna i osnove nastaje kao rezultat vezivanja vlakna i osnove (matrice), a od njih se razlikuje morfologijom i kemizmom te predstavlja kritično područje kod vlaknima ojačanih kompozita. Na graničnoj površini, tj. između vlakna i polimerne osnove, postoje barem tri vrste veza: kemijske, mehaničke i električne. No, neovisno o prirodi i vrsti veza na graničnoj površini, prijenos opterećenja preko nje isključivo je mehanički. Tako granična površina ima zadatak prenositi opterećenja s polimerne osnove na vlakna za ojačanje.

Može se reći da je granična površina područje u kojemu se svojstva vlakna mijenjaju do svojstava polimerne osnove, i obrnuto. Zna se da reakcije koje nastaju između polimerne osnove i površine vlakna nisu određene vezom u samo jednoj plohi, nego se to područje međusobnog djelovanja širi u obliku prijelaznoga područja - jednog međusloja čija debljina može varirati od 5 do 100 nm. Pretpostavlja se da je taj međusloj trodimenzijsko područje koje okružuje cijelo vlakno i čija su svojstva drugačija od svojstava osnove, ali postupno konvergiraju prema njima porastom udaljenosti od vlakna. Kompleksnost ovih međuslojeva najbolje se može ilustrirati shematskim modelom, koji omogućuje da se na jednom području nabroji mnogo različitih karakteristika.



Slika 19. Shematski prikaz međusloja vlakno-matrica [4]

Struktura i priroda toga prijelaznog područja ili međusloja znatno utječe na karakteristike i svojstva vlaknima ojačanih kompozita, a osobito na mehaničku čvrstoću, otpornost na zamor, te na kemijsku i toplinsku postojanost.

Značenje nastanka mikropukotina u graničnom međusloju

Ponašanje vlaknima ojačanih kompozita tijekom njihove uporabe izravno ovisi o učestalosti mikropukotina na graničnoj površini vlakno-osnova, to jest u nastalom međusloju. Tih mikropukotina gotovo uvijek ima, a nastaju zbog uključivanja mjehurića zraka i raznih onečišćenja tijekom izrade vlaknima ojačanih kompozita. Na pojavu i učestalost mikropukotina u graničnom području utječu karakteristike same osnove, kao što je njezin kemijski sastav, sposobnost ovlaživanja, sporedni produkti koji nastaju tijekom polimerizacije osnove itd., a također i karakteristike vlakna, te sam postupak izradbe vlaknima ojačanih kompozita.

Zbog slabog ovlaživanja vlakana za ojačanje, samom polimernom osnovom granična površina između vlakna i osnove predstavlja kritično mjesto na kojemu se pojavljuju mikropukotine te je česta i pojava šupljina i uključevina zraka tijekom izrade vlaknima ojačanih kompozita, što na tim mjestima uzrokuje veliku koncentraciju naprezanja bez obzira na način i vrstu opterećenja. Ako su šupljine smještene tik uz vlakna mogu prouzročiti i njihov lom, ako su tlačno opterećena. Ako su pak šupljine i uključevine zraka potisnute u polimernu osnovu i ne dodiruju vlakna, tada imaju manji utjecaj na svojstva vlaknima ojačanih kompozita. Slaba veza između vlakna i osnove često uzrokuje napukline, a u konačnici i lom međusloja već pri malim opterećenjima zbog velike koncentracije naprezanja na tim mjestima. Šupljine u vlaknima ojačanim kompozitima mogu se pojaviti u različitim oblicima i veličinama, a nastaju iz dva osnovna razloga:

- ulazak zraka u vlaknima ojačani kompozit tijekom njegove izradbe, pa nastaju uključevine zraka zbog kemijske reakcije tijekom polimerizacije osnove i/ili zbog slabog ovlaživanja vlakna polimernom osnovom,
- stvaranje vlačnih i tlačnih naprezanja u vlaknima ojačanom kompozitu zbog različitog ponašanja osnove i vlakana za očvršćivanje tijekom polimerizacije osnove.

Zaključak je da je kvaliteta granične površine vlakno-osnova ključna za dobra svojstva vlaknima ojačanih kompozita. Zato se ona može i mora poboljšati tretiranjem površine vlakana različitim adhezivnim sredstvima. Njihova je zadaća poboljšati i povećati čvrstoću prijanjanja između vlakna i polimerne osnove, povećati savitljivost nastalog međusloja i omogućiti bolje ovlaživanje površine vlakana polimernom osnovom. Tako se smanjuje mogućnost nastanka šupljina i uključevina zraka u međusloj i znatno poboljšavaju mehanička svojstva vlaknima ojačanog kompozita.

Međuslojna smična čvrstoća

Mjera za kvalitetu granične površine, odnosno međusloja, jest međuslojna smična čvrstoća. Ona ovisi o čvrstoći prijanjanja između vlakna za ojačanje i osnove te o veličini dodirnih površina vlakana i adhezije na tim površinama. Razumljivo je da je dobra adhezija potrebna duž cijele granične površine vlakana za ojačanje i osnove, upravo zato da bi se što veće opterećenje moglo prenijeti s polimerne osnove na vlakna za ojačanje.

Kad je riječ o anorganskim vlaknima (npr. staklenim) ojačanim kompozitima, adhezija se može podijeliti u tri segmenta:

- kemijska adhezija nastaje zbog kemijskih veza između površine vlakna i osnove. Takve veze mogu se postići u izravnoj reakciji između vlakna i osnove ili pak uporabom veznih posrednika koji stvaraju “kemijski most” između vlakana i osnove. Kako se staklena vlakna slabo vežu s polimernom osnovom, tretiraju se veznim posrednicima od kojih su najvažniji silani. Oni mogu kemijski reagirati i s površinom staklenoga vlakna i s polimernom osnovom te tako pojačavaju međuslojnu smičnu čvrstoću i hidrotermalnu otpornost novonastalog međusloja.
- fizikalna adhezija nastaje zbog smanjenja slobodne energije sustava u slučaju kada se spoje dvije površine različitih površinskih napetosti i čine međusloj s međuslojnom napetosti.
- mehanička adhezija nastaje zbog hrapavosti površine vlakna i sposobnosti ovlaživanja polimerne osnove. Poveća li se površinska hrapavost vlakna za ojačanje, povećat će se i njegova sposobnost da bude ovlaženo.

Istraživanje granične površine vlakno-osnova i međusloja između ta dva gradbena materijala vlaknima ojačanog kompozita, iznimno je važno za njihovo što čvršće povezivanje, a to izravno utječe na svojstva vlaknima ojačanih kompozita.

Oštećenja vlaknima ojačanih kompozita

Nastanak i razvoj oštećenja u kompozitnim materijalima vrlo je složena pojava, a može se razvrstati na osnovne vrste oštećenja:

- poprečni lom osnove (matrice),
- odvajanje vlakana za ojačanje od osnove (izvlačenje),
- lom samih vlakana,
- popuštanje veze vlakno-osnova te
- raslojavanje ili delaminacija.

Na nastanak oštećenja jako utječe vrsta uporabljenih vlakana za ojačanje, jer se znatno razlikuje kod staklenih, ugljičnih, polietilenskih i aramidskih vlakana. Suprotno metalima, početak loma kod kompozitnih materijala može se dogoditi već pri niskim naprezanjima zbog velikoga broja mikropukotina (obično nastalih tijekom izrade) koje rastu istodobno. Kako je istaknuto, one mogu biti u samoj osnovi, vlaknima, graničnoj površini između vlakna i matrice, to jest u međusloju kompozitnog materijala. Iako je, kao što je spomenuto, lom kompozitnih materijala složena pojava, dva su osnovna tipa loma vlaknima ojačanih kompozitnih materijala:

- Lom unutar sloja

Mikropukotine se nakupljaju unutar polimerne osnove ili vlakana te se spajaju i protežu duž vlakana za ojačanje. Ako se radi o višeslojnim vlaknima ojačanim kompozitnim materijalima, tada je polimerna osnova otporna na smična naprezanja - tzv. smična krutost između vlakana, odnosno slojeva vlakana - te daje zadovoljavajuću rasteznu i tlačnu čvrstoću i krutost u okomitom smjeru spram vlakana za ojačanje. Ako su pak mikropukotine u samim vlaknima, one su kratke i

slučajno raspoređene te uzrokuju lom vlakna čime se prekida veza vlakno-osnova, tj. odvaja se vlakno od osnove;

- Lom između slojeva (raslojavanje ili delaminacija)

Takvi lomovi kreću s ruba višeslojnih vlaknima ojačanih kompozita (laminata) i to s mjesta velikih naprezanja na kojima se javljaju mikronapukline između slojeva. One se mogu proširiti kroz cijeli laminat i podijeliti ga na dva dijela. Nakon delaminacije najviše je smanjena tlačna čvrstoća u ravnini laminata. Delaminacija je uvijek na spoju slojeva laminata kod loma osnove gornjega sloja (paralelan s vlaknima) prije pojave same delaminacije. Lom polimerne osnove događa se iz dva razloga: zbog smicanja, pri čemu izravno ovisi o iznosu sile opterećenja te zbog savijanja, kada ovisi o krutosti na savijanje vlaknima ojačanog kompozita. [4]

5.1. TERMODINAMIKA MEĐUSLOJA

Jedan od načina dobivanja kompozita dobrih svojstava je povezanost vlakna i matrice, što je ograničeno termodinamiko međusloja. Sposobnost kvašenja vlakna matricom je potreban preduvjet za formiranje kompozitnog materijala. Često mikroskopski pregled prijelomnih površina kompozitnog materijala pokazuju loše ojačane površine, i/ili prisutnost praznina što je pokazatelj lošeg kvašenja. Loša mehanička svojstva pripisuju se slaboj adheziji vlakno-matrica, što je povezano sa slabim kvašenjem. Postoji veza između površinske kemije vlakna, slobodne površinske energije matrice, termodinamičkog kvašenja vlakna matricom, i adhezije između vlakna i matrice. Stvaranje adhezije tijekom prerade kompozita je dinamički događaj na koji mogu utjecati uvjeti prerade i to se u konačnici može odraditi na svojstva kompozita.

Termodinamika daje odličan okvir na temelju kojeg se može proučavati površina vlakna i matrice i mogu se kvantificirati interakcije koje se mogu dogoditi kada se spoje zajedno. Za niskomolekulne kapljevine za koje je vremenska konstanta za pregrupiranja molekula kratka, dostupni su *ravnotežni termodinamički odnosi* koji opisuju interakciju između površine čvrste i kapljevite faze i mogu se uporabiti za razumijevanje i predviđanje interakcije polimerne matrice sa vlaknima za ojačanje.

Površinska energija

Atom ili molekula na površini kapljevite ili čvrste faze ima mrežnu silu koja djeluje na njega vukući ga u unutrašnjost faze. Ta pojava se obično naziva površinska napetost (ili „površinska energija“). U kapljevini gdje se pregrupiranje molekula događa na mikroskopskom nivou, površinska napetost se može promatrati kao stvaranje „kore“ na površini. Kapljevine sa slabo izraženom polarnošću imaju niske vrijednosti površinske napetosti, dok one jake polarnosti imaju visoke vrijednosti površinske

napetosti (npr. voda). I čvrsta tijela imaju slobodnu površinsku energiju, ali pošto se atomi ne mogu pregrupirati spontano kao u kapljevinu, njihova površina izgleda nepromijenjena.

Kontaktni kut

Kada se kapljevina površinske napetosti γ_{LV} stavi na čvrstu površinu površinske napetosti γ_{SV} , kapljevina će spontano oformiti kapljicu ili će se proširiti („razliti“) u film.

Ako se formira kapljica, može se izvesti odnos između površinske napetosti kapljevina i čvrstog tijela, ako se površinske napetosti smatraju kao vektori koji djeluju na kraju kapljice. Slobodna površinska energija međupovršine čvrsto-kapljivito označena je s γ_{SL} i ravnoteža se izražava izrazom:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta$$

gdje je:

θ – kut između površine kapljice i površine čvrstog tijela,

γ_{SV} – energija površinske napetosti između površine i čvrstog tijela

γ_{LV} - energija površinske napetosti između okoline i kapljive.

Za mjerenja površinske napetosti postoje različite kemijsko-fizikalne metode, optičke i gravitacijske. Kod kapljevina kod kojih je kontakti kut veći od 90° nema kvašenja. Kvašenje se događa kod kapljevina s kontaktnim kutem manjim od 90°. Ako je kontakti kut 0° dolazi do razlijevanja kapljive.

Ravnoteža se izražava jednačbom:

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} \geq \gamma_{LV}$$

Nejednačba pokazuje da za sve slučajeve kvašenja i razlijevanja površinska napetost kapljevine koja kvasi mora biti veća od površinske napetosti čvrstog tijela.

Adhezijski rad

Pojam koji se često upotrebljava za opisivanje stanja međupovršina/međuslojeva je adhezijski rad (W_a), koji predstavlja termodinamički rad potreban za stvaranje površine čvrsto-para i kapljevito-para razdvajajući međupovršinu čvrsto-kapljevito.

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$$

Ako se u jednačbu uvrsti izraz za kontaktni kut, adhezijski rad je dan sljedećim izrazom:

$$W_a = \gamma_{LV} \cdot (1 + \cos \theta)$$

Ovaj izraz je termodinamički rad i predstavlja povratnu ravnotežnu vrijednost. Prema navedenom izrazu maksimalna vrijednost rada adhezije javlja se kada je kontaktni kut jednak nuli, a adhezijski rad jednak je dvostrukoj vrijednosti površinske napetosti kapljevine.

Kvašenje

Ključ stvaranja dobrih svojstava kompozita je dobro kvašenje vlakana matricom tijekom njegovog nastajanja. Male praznine duž vlakana mogu stvoriti vrlo velike kapilarne sile koje pripomažu procesu kvašenja. Kontaktni kut kontrolira kapilarne sile, jer pri kutu $\theta = 90^\circ$ kapilarne sile nestaju, a za kuteve $\theta > 90^\circ$, sprije čena je infiltracija.

5.2. MODIFIKACIJA POVRŠINA

Termodinamika međuslojeva/međupovršina objašnjava važnost kvašenja za postizanje optimuma svojstava pri površinskoj slobodnoj energiji matrice manjoj od površinske energije čvrstog tijela. Većina polimera ima niske vrijednosti slobodne površinske energije, 20 – 45 mJ/m², koje se blago smanjuju povećanjem temperature. Čvrsta tijela, s druge strane, mogu imati površinske energije koje variraju preko nekoliko redova veličina. Površine čvrstih tijela koje su bile izložene okolišnim uvjetima žele minimalizirati svoju slobodnu površinsku energiju i, stoga, apsorbirati tvari ili stvoriti okside da snize svoju slobodnu površinsku energiju. U nekim slučajevima ovakva površina može imati nižu slobodnu površinsku energiju nego neke polimerne matrice. U svrhu povećanja slobodne površinske energije čvrstog tijela razvijeni su postupci površinske i završne obrade kako bi se poboljšalo kvašenje.

Površinske obrade

Pojam „površinske obrade“ se obično odnosi na kemijsku obradu površine kojom se mijenja njen kemijski sastav, te se tako povećava površinska energija i/ili stvaraju povoljne mikrotopografske značajke bez namjernog prevlačenja površine zaštitnim slojem. Ovi postupci se provode iz plinskih ili kapljevutih, kiselih ili baznih faza, ili

bombardiranjem površine radijacijom raznih tipova. Površinska obrada pri formiranju kompozita je poželjna da potpomogne kvašenje i poboljša kontakt između vlakna i matrice.

Završne obrade

Pojam „završne obrade površine“ se odnosi na nanošenje zaštitnog sloja na površinu ojačala nakon ili zajedno s površinskom obradom. Debljine nanesenog sloja kreću se oko 100 nm. Svrha je zaštita površina ojačala tijekom manipulacije ojačalom tijekom oblikovanja kompozita. Većina ojačala je osjetljiva na napukline i čak slabi kontakt sa drugom tvrdom površinom može dovesti do stvaranja kritične količine napuklina koje će smanjiti čvrstoću. Završni sloj debljine 100 nm onemogućava direktan kontakt između pojedinih vlakana. Ovakva obrada može se primijeniti na bilo kojoj vrsti ojačala, a razvijena je u tekstilnoj industriji da bi se olakšalo slaganje vlakana u svežanj, a da pri tome ne dođe do oštećenja pojedinih vlakana.

Druga svrha zaštite površine je da se zaštiti površinu vlakna od okolišnih uvjeta i kontaminacije kako ne bi došlo do smanjenja slobodne površinske energije. Tijekom oblikovanja kompozita ovaj zaštitni sloj se rastvara i nestaje s površine vlakna, ali je vrlo koristan u osiguravanju kvašenja. Kako su sredstva za završnu zaštitu obično u obliku otopine potencijalni problem predstavlja zadržavanje otapala i njegovo hlapljenje tijekom početnih faza ciklusa oblikovanja kompozita. Velika površina vlakna, male dimenzije i veliki volumen predstavljaju dodatni potencijalni problem zbog generiranja šupljina u kompozitu.

Prevlačenje (*sizing*)

Za područje kompozita ovaj problem se odnosi na bilo koju površinsku obradu ojačala u cilju zaštite od oštećenja tijekom prerade, poboljšanja prionjivosti s matricom ili poboljšanja njegovih mehaničkih svojstava. Prevlačenje je fizikalno slično završnoj obradi, upotrebljava se za vlakna debljine oko 0.1 μm , ali se razlikuje u

kemijskom sastavu. Gotovo se uvijek primjenjuje za staklena vlakna, a ponekad i kod drugih ojačala. Ono predstavlja proces namjernog prevlačenja ojačala pri kojem u nekim slučajevima dolazi do kemijske reakcije s površinom, dok pri površinskoj obradi dolazi do namjerne kemijske modifikacije ojačala pri čemu u nekim slučajevima može doći do stvaranja prevlaka. Ostali sinonimi su *završna obrada*, koja dolazi iz područja tekstilne industrije i odnosi se na prevlake koje daju vlaknima fleksibilnost i slična svojstva važna pri tkanju, ili na području kompozita „*coupling agent*“ kojim se označuje poboljšanje mehaničkih svojstava i trajnosti nastalog kompozita uslijed bolje povezanosti ojačala s matricom.

Tipične otopine za prevlačenje staklenih vlakana sadrže silane ili kombinaciju s ostalim sastojcima kao što su dodaci za stvaranje filmova, antistatici i podmazivala. Prevlačenje se provodi već pri proizvodnji staklenih ojačala, kako bi se vlakna zaštitila od korozivnog djelovanja vode iz okoliša. Silani hidroliziraju i reagiraju s hidroksilnim skupinama na površini stakla stvarajući vrlo stabilne siloksanske veze. Ostali sastojci sredstva za prevlačenje zaštićuju staklena vlakana od mehaničkih oštećenja i potpomažu infiltraciju matrice. Silani se često nadopunjuju titanatima i cirkonatima.

Kako bi se osiguralo jednoliko prevlačenje, prevlake su najčešće na polimernoj osnovi, kao što su škrob i njegovi derivati i neki vinil polimeri. Izbor je određen kompatibilnošću s matricom, nivoom potrebne zaštite, uvjetima tkanja i troškovima.

Prevlake predstavljaju oko 1 maseni % ili manje ukupnog kompozita, sastoje se najvećim dijelom od otapala, a ekološki razlozi nalažu da otapala po mogućnosti bude voda pa su prevlake u većini slučajeva vodene otopine ili vodene emulzije.

Idealne prevlake bi trebale biti kemijski kompatibilne s matricom i ne bi smjele negativno utjecati na mehanička svojstva kompozita. U protivnom slučaju prevlake treba ukloniti pri formiranju kompozita ispiranjem ili grijanjem. Takvi postupci ili oštećuju vlakna ili ostaci mogu sprječavati dobru povezanost matrica/ojačalo. Ipak

prevlake su danas često u uporabi, naročito kod tkanih ojačala. Postoji čitav niz prevlaka u obliku filma koje su kompatibilne s matricom i koje imaju raširenu ulogu za poliesterske i epoksidne matrice.

Međupovršine, odnosno međuslojevi, kod kompozitnih materijala jako utječu na njihova mehanička svojstva. Postoji vrlo veliki broj istraživanja odnosa međupovršina/međuslojeva, adhezije matrice-ojačalo i mehaničkih svojstava kompozita za različite kombinacije matrice i ojačala. Međupovršine, odnosno međuslojevi, postoje i jako utječu na konačna svojstva kompozita. Razumijevanje kemije, fizikalnih svojstava i morfologije međuslojeva preduvjet je boljeg predviđanja mehaničkih svojstava kompozita.

6. UTJECAJ MEDIJA NA KOMPOZIT

Međupovršina matrica – ojačalo i međuslojevi, koji nastaju kao rezultat povezivanja ojačala i matrice, a morfologijom i kemijskim sastavom bitno se razlikuju od materijala matrice i ojačala, predstavlja kritična područja kompozita. To je posebice izraženo pri djelovanju medija. Pri istraživanju djelovanja medija najzanimljivija je voda s kojom su mnogi materijali u dodiru preko vlažne atmosfere ili uslijed uranjanja.

Mehanizam djelovanja vode na polimerne kompozite puno je složeniji nego kod neojačane polimerne matrice i tumači se na nekoliko načina:

- apsorpcijom vode uz međupovršine ojačalo-matrica i time degradacijom adhezije između ojačala i vezivnog sredstva,
- postojećim defektima u obliku većih ili manjih šupljina uslijed uklapanja mjehurića zraka ili hlapljivih tvari, koje nastaju tijekom očvršćivanja matrice,
- postojanjem mikropukotinica nastalih tijekom proizvodnje kompozita.

Apsorbirani mediji utječu u većoj ili manjoj mjeri na mehanička svojstva polimernih kompozita. Svakako je najrašireniji kapljeviti medij voda i svi je polimeri apsorbiraju na različite načine i u različitim količinama, bilo iz vlažne atmosfere ili uslijed uranjanja u vodu. Mehanizam apsorpcije vode, plastificirajući efekt apsorbirane vlage i sniženje temperature staklastog prijelaza su relativno poznati i često istraživani procesi kod polimera. Kod kompozita je, međutim, ustanovljeno da je mehanizam apsorpcije vode puno složeniji nego li kod neojačane polimerne matrice.

Pri određivanju apsorpcije vode u polimere, a naročito polimerne kompozite važno je razlikovati količinu prividno i stvarno apsorbirane vode. Najčešće se apsorpcija nekog medija određuje praćenjem promjene mase tvari neposredno nakon djelovanja medija i na taj način se dobiva podatak o prividno apsorbiranom mediju. Pri određivanju stvarno apsorbiranog medija treba uzeti u obzir promjene mase uslijed izlučivanja niskomolekulnih sastojaka polimera (neizreagirani monomeri, segmenti niske molekularne mase, različiti dodaci, produkti degradacijskih procesa i sl.), pa se

promjena mase određuje nakon sušenja. Količina stvarno apsorbiranog medija karakteristična je za određeni kompozit i relativno je neovisna o temperaturi, ali povišena temperatura skraćuje vrijeme postizanja ravnotežne sorpcije.

Zbog heterogenog sastava veliku važnost pri procijeni kompozita ima međuslojna čvrstoća uslijed prijenosa naprezanja između matrice i vlakana, na koju uvelike utječe i udjel šupljina kompozita. Šupljine su nezaobilazan sastavni dio svakog kompozita i posljedica su njegovog nastajanja, a vidljive su pomoću optičkog mikroskopa uz polariziranu svjetlost. Dva su glavna uzroka njihovu nastajanju:

- zrak uključen u kompozit tijekom početne faze njegova formiranja, bilo zbog mjehurića zraka u viskoznoj smoli ili zbog nedostatka kvašenja vlakna,
- nastajanje hlapljivih sastojaka tijekom očvršćivanja kompozita pri visokim temperaturama.

Šupljine prije svega utječu na međuslojnu čvrstoću, jer predstavljaju mjesta u kojima nema veze matrica-vlakno, a time niti odgovarajućeg prijenosa naprezanja. Veći početni udjel šupljina uvjetuje, uslijed djelovanja medija, i povećanje njihova broja tijekom vremena, što dovodi do daljnjeg smanjenja međuslojne čvrstoće. Isto tako šupljine u kompozitu utječu i na ostala mehanička svojstva: veći udjel šupljina uzrokuje nešto nižu čvrstoću i modul elastičnosti kompozita.

Osim šupljina i njihove količine u kompozitu, o kojoj ponajprije ovisi količina apsorbirane vode, bitno je spomenuti i apsorpciju vode u mikrokapilarnim prostorima, koji nastaju u međuslojevima zbog nepotpunog prijanjanja matrice i vlakna ili nastaju uslijed delaminiranja izazvanog djelovanjem medija. Sve to ukazuje na važnost pripreme kompozita radi postizanja što homogenije strukture sa što manjim udjelom šupljina, te bitnost potpunijeg prijanjanja konstituenata, odnosno stvaranje što kvalitetnijeg međusloja koji uvelike utječe na mehanička svojstva kompozita. [5]

7. KOMPOZITI S PRIRODNIM VLAKNIMA

Prirodna ojačala

Proizvodnja sirovina, materijala i proizvoda, njihova uporaba i odlaganje imaju značajan gospodarski i ekološki utjecaj. Iskoristivost sirovina i ekološka prihvatljivost može se povećati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivoga i trajnoga proizvoda, ali isto tako i korištenjem obnovljivih izvora sirovina. Zbog toga je upotreba prirodnih vlakana u kompozitima u neprestanom rastu.

Prilikom razvoja bilo koje industrijske grane potrebno je imati na umu dugoročnu dostupnost sirovina. Kako bi se osigurala trajna opskrba prirodnim vlaknima, nužno je poticati razvoj poljoprivredne proizvodnje i zdravih ekosustava. Takva poljoprivreda označava ravnotežu između očuvanja prirodnih dobara i njihova korištenja, kako na lokalnomu tako i na globalnomu planu. To pretpostavlja trajni uzgoj biljaka s prirodnim vlaknima, skrb o korištenju poljoprivrednih dobara i očuvanje ekosustava.

Najveći udio u proizvodnji plastomera s prirodnim vlaknima zauzima drvo. Za to postoje dva važna razloga odnosno prednosti. Prvi je razlog dostupnost drva, a drugi je što ga ima više od svih drugih prirodnih sirovina koje dolaze u obzir za upotrebu u kompozitima.

Drvo i drugi prirodni materijali kao ojačala kod plastomera privukli su pažnju svojom niskom cijenom i ekološkom prihvatljivošću. Daljnji razvoj tih materijala i širenje njihova tržišta ovisit će o istraživanjima i poboljšanju njihovih preradbenih i uporabnih svojstava.

Kompoziti s prirodnim vlaknima

Postoji velik broj biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana. Treba ih sve uzeti u obzir prilikom promišljanja o uzgoju jer svaka od njih ima određene prednosti pred drugom. Bitna je i potražnja za pojedinim vlaknima na tržištu. Tablica 10. prikazuje popis važnijih biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana i grubu procjenu njihovih količina.

Izvor prirodnih vlakana	Svijet (tona osušene tvari)
Drvo	1 750 000 000
Slama (pšenica, riža, ječam, zob, raž, lan, trava)	1 145 000 000
Stabljika (kukuruz, sorgum, pamuk)	970 000 000
Šećerna trska	75 000 000
Trska	30 000 000
Bambus	30 000 000
Sortirani pamuk	15 000 000
Srčika (juta, kenaf, konoplja)	8 000 000
Papirus	5 000 000
Liko (juta, kenaf, konoplja)	2 900 000
Pamuk pročišćen	1 000 000
Esparto trava	500 000
List (američka agava, manila, henequen)	480 000
Sabai trava	200 000
UKUPNO	4 033 080 000

Tablica 9. Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana [7]

Ovisno o njihovom porijeklu, prirodna vlakna svrstavamo u grupe kvalitete:

- sjeme,
- liko,
- lišće,
- plod.

Najčešću uporabu imaju vlakna od lika i lišća. Primjeri liko vlakana su konoplja, juta, lan, rami, kenaf. Vlakna od lišća se dobivaju iz agave i banane. Usporedba nekih prirodnih vlakana i staklenih vlakana dana je u tablici 10.

Vlakno	Gustoća g/cm ³	Rastezni modul GPa	Rastezna čvrstoća MPa
Lan	1,5	100	1100
Indijska konoplja	4,45	2,5 - 13	460 - 530
Američka agava	1,45	9,4 - 15,8	570 - 640
Konoplja	1,48	-	690
E – staklo	2,54	76	150

Iz tablice 10. se vidi da su najistaknutija vlakna od lana, koja imaju rastezni modul viši od staklenih vlakana. Usto, lan ima nižu gustoću od staklenih vlakana, proizvodeći na taj način lakše kompozite boljih mehaničkih svojstava.

Tablica 10. Svojstva nekih prirodnih vlakana i E-stakla [7]

Dok se drveno brašno i vlakna dobivena iz drva upotrebljavaju kao jeftina zamjena za mineralna punila i ojačala u polietilenu, poli(vini-kloridu) i polipropilenu, ili za poboljšanje svojstava oporabljenih plastomera, vlakna dobivena iz biljaka kao što su lan, konoplja ili juta trenutno su konkurencija staklenim vlaknima u kompozitima uslijed svoje ekološke prihvatljivosti i povoljne cijene.

Prirodna vlakna imaju niz prednosti:

- dobivaju se iz obnovljivih izvora,
- niske su gustoće,
- nisu abrazivna,
- lako se oporabljaju,
- biorazgradiva su,
- lako su dostupna u velikim količinama,
- imaju dobra akustička i izolacijska svojstva,
- mali je utrošak energije potreban za preradbu,
- niske su cijene.

Tablica 11. prikazuje dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana.

Dimenzije vlakana, mm		
Tip vlakna	Prosječna duljina	Debljina
Pamuk	10 – 60	0,02
Lan	5 – 60	0,012 - 0,027
Konoplja	5 – 55	0,025 - 0,050
Manilska konoplja	2,5 – 12	0,025 - 0,040
Bambus	1,5 – 4	0,025 - 0,040
Esparta (Alfa)	0,5 – 2	0,013
Slama od žita	1 – 3,4	0,023
Indijska konoplja	1,5 – 5	0,02
Listopadno drvo	1 – 1,8	0,03
Četinjače	3,5 – 5	0,025

Tablica 11. Dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana [7]

Vlakna od lana.

Lan dobivamo iz peteljke biljke lana vrste *Linum usitatissimum*. Biljka daje ulje iz sjemena i vlakna iz peteljke, znana kao liko vlakna. Od vlakana se može izrađivati laneno platno, što je bilo i jedno od prvih tvorničkih vlakana u izradi tekstila. Ista vlakna se koriste i za ojačavanje kompozita. Kanada je najveći svjetski proizvođač i izvoznik lana; zasađenih 2,1 milijun jutara zemlje u 2000-oj godini. Međutim, samo se lan s 15 % jutara koristi u industriji celuloze i papira.

Vlakna konoplje

Vlakna konoplje se dobivaju iz liko vlakana biljke *Cannabis sativa*. Vlakna su dobila negativan publicitet zbog svojih povezanosti s marihuanom. Obje biljke su identične po izgledu, ali različite po udjelu tetrahidrokanabinola (THC). THC je zaslužan za

psihoaktivna svojstva marihuane. Vlakna industrijske konoplje sadrže manje od 0,5 % THC, dok marihuana ima 3 do 5 % THC. Konoplja potječe iz Kine, ali je 1750. imala i najveći poljoprivredni prinos u svijetu, kada se koristila za izradu odjeće, platna, konopa i ulja. 1958. godine zbog teškog razlikovanja od marihuane, zabranjen je uzgoj konoplje u SAD – u, ali danas sve više raste interes za povratak industrije konoplje. Konoplja je višestruko upotrbljiva tkanina koja se može upotrebljavati za izradu tekstila, kućanskog namještaja, papira, u građevinarstvu i automobilske industriji.

Kompozit izrađen s 20 masenih % vlakna konoplje ima rastezna čvrstoću od 35 MPa i rastezni modul od 4,4 GPA. Mehanička svojstva ovakvih kompozita mogu se uspoređivati sa svojstvima drva. Na primjer, tipično tvrdo drvo ima modul elastičnosti od oko 10 GPA, s naprezanjem pri lomu od oko 30 MPa u smjeru vlakna i oko 3 MPa kada je naprezanje okomito na vlakna. Značajna prednost kompozita s vlaknima konoplje nad drvom je što se različito orijentiranim vlaknima mogu postići dobra svojstva u svim smjerovima (kvaziizotropnost) što nije slučaj u drva.

Svojstva i primjena kompozita s prirodnim vlaknima

U odnosu na ostale kompozite, za primjenu kompozita s prirodnim vlaknima postoje neka ograničenja. Prvo se ograničenje odnosi na niže temperature preradbe. Granična temperatura razgradnje prirodnih vlakana kreće se oko 200 °C, iako je moguće postići i više temperature, ali kroz kraće vrijeme. To je ujedno i ograničenje za moguće uporabive plastomere. Izbor je uglavnom sveden na polipropilen (PP), poli(vinil-klorid) (PVC), polietilen (PE) i polistiren (PS). No, treba naglasiti da ovi plastomeri čine približno 70 % ukupne proizvodnje polimera, pa troše i značajne količine punila i ojačala. Drugo ograničenje je upijanje vode prirodnih vlakana, njihova higroskopnost. Upijanje vode može uzrokovati bubrenje vlakana što pak uzrokuje slabu dimenzijsku stabilnost. Kad je vlakno omotano polimerom upijanje je vode najmanje. Nemoguće je potpuno ukloniti upijanje vode bez primjene skupe površinske zaštite kompozita, no moguće ga je smanjiti, primjerice, kemijskom

promjenom hidroksilnih grupa prisutnih u vlaknu što, naravno, povišuje cijenu. Dobro prijanjanje vlakna s matricom također smanjuje upijanje vode. Ova ograničenja treba uzeti u obzir prilikom odabira i primjene ovih kompozita.

Celulozna vlakna / punila mogu biti razvrstana u tri razreda, ovisno o njihovu ponašanju u polimernoj matrici.

- Drvni i ostali biljni otpad ubraja se u skupinu punila koja povećavaju rastezni i savojni modul ali malo utječu na čvrstoću kompozita.
- Drvena vlakna i reciklirani papir imaju veći utjecaj na rast rasetznog modula. Pritom povećavaju i čvrstoću kompozita, uz upotrebu veziva koja poboljšavaju prijenos naprezanja s matrice na vlakno.
- Prirodna vlakna od biljaka (kenaf, juta, lan i sl.) vrlo su učinkoviti dodaci. Rastezni i savojni modul je kod tih kompozita značajno viši nego kod kompozita s drvnim vlaknima, osobito ako se uzme u obzir omjer povišenja rasteznog modula i gustoće kompozita. Taj je omjer u razini s kompozitima ojačanima staklenim vlaknima.

U tablici 12. navedene su vrijednosti rastezne čvrstoće nekih prirodnih vlakana.

Vlakna	Rastezna čvrstoća*, GPa
Kenaf	11,91
Konoplja	8,95
Drvo	7,48
Agava	6,14
Pamuk	3,54

Tablica 12. Vrijednosti rastezne čvrstoće [7]

* Sve su vrijednosti pojedinačna čvrstoća vlakana osim za agavu, za koju je iskazana čvrstoća snopa vlakana

Postupci proizvodnje kompozita s prirodnim vlaknima

U plastičarskoj industriji kao dodatak polimerima pretežno se rabio talk, kalcijev karbonat, tinjac te staklena i ugljikova vlakna. Godišnje se trošilo oko 2,5 milijuna tona tih dodataka i ojačavala. Postojao je svojevrсни otpor prerađivača prema uporabi drvnih i prirodnih vlakana, kao što su kenaf ili lan, ponajviše zbog njihove velike nasipne gustoće, niske toplinske postojanosti i sklonosti prema upijanju vode, te neprikladnosti opreme za preradbu kompozita s prirodnim vlaknima. Do značajne je promjene došlo zadnjih desetak godina. Veće je poznavanje svojstava drva i ostalih izvora prirodnih vlakana u plastičarskoj industriji, razvijena je nova oprema za preradbu polimera ojačanih prirodnim vlaknima, a postoje i bolja veziva i prijanjala. Sve je to povećalo interes plastičarske industrije za preradbu tih kompozita. I u drvnjoj se industriji također promijenio pristup. Povećana trajnost proizvoda od drvo-plastomernih kompozita uz minimalno održavanje čini ih naročito zanimljivim u građevinarstvu kao zamjena za drvenu građu. Preradba plastomernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima obično se provodi u dva koraka. Prvo se sastojci smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Smješavanje komponenata može se obaviti kontinuirano u ekstruderu, s time da se drvo može dodati zajedno s plastomerom ili u plastomernu taljevinu. Moguće je cikličko smješavanje komponenata u miješalicama, ali se mogu pojaviti odstupanja u kvaliteti od šarže do šarže. Za proizvodnju plastomernih kompozita primjenjuje se ekstrudiranje, injekcijsko prešanje, kalandriranje, toplo oblikovanje i pultrudiranje. Za proizvodnju plastomernih kompozita najviše se primjenjuje ekstrudiranje, i to za razne pune i šuplje profile. Postoje razni tipovi ekstrudera za preradbu drvo-plastomernih kompozita. To može biti ekstruder s jednim pužnim vijkom ili ekstruder s dva pužna vijka. Osi ekstrudera s dva pužna vijka mogu biti paralelne ili pod kutom. U nekim postupcima primjenjuju se ekstruderi u tandemu: prvi za smješavanje, a drugi za protiskivanje taljevine. Voda iz vlakana koja čini njihovu mokrinu odstranjuje se u ekstruderu tijekom preradbe. Injekcijsko se prešanje primjenjuje rjeđe, i to za oblikovanje proizvoda složenijih oblika. Sastojci se prvo smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Osim smješavanja u miješalici,

smješavanje se može provesti ekstrudiranjem nakon čega se pravi granulat. Tako pripravljen granulat injekcijski se preša. Prednosti ekstrudiranja u odnosu na injekcijsko prešanje su manja osjetljivost na mokrinu materijala i dobivanje gotovoga proizvoda u jednom koraku jer se smješavanje komponenata može obaviti u istom ekstruderu kojim se oblikuje profil. No to zahtijeva ekstruder s dva pužna vijka da bi se osiguralo smješavanje, a njegova cijena je viša od jednopužnoga. Također se primjenjuje kalandriranje s toplim oblikovanjem i pultrudiranje, ali u znatno manjem opsegu. Kalandriranjem se najčešće proizvode ploče koje se koriste za oblaganje u građevinarstvu. Pultrudiranjem se proizvode razni puni profili provlačenjem kroz matricu. Šuplji profili ograničenih duljina mogu se proizvesti namatanjem na jezgru s posmikom.

7.1. DRVNO-PLASTOMERNI KOMPOZITI

Drvno-plastomerni kompoziti (DPK) relativno su nova skupina materijala koja je započela svoj razvoj preko Atlantika, ali u zadnje vrijeme se i u Europi pokazuje veliko zanimanje za taj materijal. Taj pojam pokriva iznimno široko područje kompozita koji primjenjuju polimere od polipropilena do poli(vinil-klorida), i veziva/punila od drvnoga brašna ili drvnih vlakana. Ti novi materijali proširuju koncepciju drvenih kompozita od čiste iverice u nova područja i, što je još važnije, u novu generaciju kvalitetnih proizvoda. Prva generacija drvnih kompozita bila je kombinacija recikliranoga drvnoga brašna ili piljevine i veziva na bazi duromera. Ti su materijalibili sasvim dobri za nezahtjevne primjene. Nova generacija drvno-plastomernih kompozita, osim što se brzo razvila, dovela je do kompozita koji imaju dobra mehanička svojstva, visoku dimenzijsku stabilnost i mogu se oblikovati u složene oblike. Oni su čvrsti, stabilni i mogu se ekstrudirati ili injekcijski prešati u uskim tolerancijama. Najuobičajeniji kompoziti toga tipa proizvode se smješavanjem drvnoga brašna i plastomera, a dobiveni se materijal može prerađivati postupcima koji su tipični za plastiku, iako materijal ima svojstva i drva i plastike. Drvo može biti u obliku piljevine ili kao stari drveni otpad, što znači da nije potrebno trošiti dodatne drvene resurse za proizvodnju ovoga kompozita, već se može koristiti otpadno drvo koje bi se u najboljem slučaju spalilo, ako ne i bacilo. Tako ono postaje sirovina što je očiti dokaz da recikliranje može biti unosno i okolišno pogodno. Polimerni materijali također mogu biti reciklirani, na primjer PE vrećice, iako se kod zahtjevnije primjene treba izbjegavati te se upotrebljava novi polimerni materijal. U drvno-plastomernim kompozitima je uporaba dostigla svoj cilj – od otpada proizvoda kratkoga životnoga vijeka radi se dugovječni proizvod. Drvno-plastomerni kompoziti su proizvodi koji ne zahtijevaju daljnju obradu. Postojani su na vremenske uvjete, vodu i plijesan te se primjenjuju i na otvorenomu prostoru gdje bi samo drvo bilo neprikladno.

DPK imaju mnogo prednosti:

- koriste jeftine i lako nabavljive sirovine,
- cijenom su konkurentni i drvu i plastomerima,
- lako se proizvode primjenom već postojećih tehnika proizvodnje,
- proizvodi mogu biti raznoliki i veličinom i oblikom,
- ne zahtijevaju površinsku zaštitu poput drva,
- smanjena je cijena održavanja u odnosu na drvo,
- mogu se spajati čavlima i obrađivati postupcima za obradbu drva.

Nemoguće je napraviti savršeni materijal, što se vidi i po nedostacima DPK-a:

- imaju veću gustoću od plastomera i drva,
- skuplji su od drva,
- cijena montaže je veća,
- za proizvodnju je potrebna veća količina energije u odnosu na drvo,
- niže su čvrstoće u odnosu na drvo.

Jedan od razloga razvoja drvno-plastomernih kompozita je ekološko motrište. Pritisci na industriju u pogledu oporabljivosti i održivoga razvoja svakodnevno rastu. Zbog toga postoji jasna potreba za produžetkom životnoga vijeka materijala kao što je drvo. Ovakvo iskorištavanje materijala, na koje se gleda kao da je otpad, daje potporu načelima održivoga razvoja. Proizvođačima polimernih materijala jasno je da moraju što manje ovisiti o petrokemijskoj industriji zbog stalnoga rasta cijena nafte. Drvna industrija također ima potrebu povećati iskoristivost resursa i oporabiti otpad koji se neminovno javlja. Dolaskom DPK-a dobrotu iskorištenja drva povećala se za 40 % u odnosu na starije metode oporabe.

DPK pridonosi okolišu i na sljedeće načine:

- ima mali postotak otpada (koji je lako oporabljiv),
- DPK ne sadrži formaldehide ili hlapljive organske sastojke,
- DPK je oporabljiv proizvod (može se samljeti te ponovo upotrijebiti),
- kao otpad nije opasan i može se odlagati s ostalim otpadom.



Slika 20. Polietilenske granule, drveno brašno i granule drvno-plastičnog kompozita

Svojstva i primjena drvno-plastomernih kompozita

Drvno-plastomerni kompoziti su materijali koji, slično kao polimerni materijali, imaju mnogo sastojaka. Osnovnoj mješavini drva i plastomera dodaju se dodaci za poboljšanje preradljivosti i promjenu svojstava proizvoda. Tipična sirovina je fino drveno brašno (veličina čestica 0,25 – 0,5 mm) koja se smješava s plastomerom i dodacima. Drvno-plastomerni kompoziti imaju svojstva obaju materijala. Imaju krutost i čvrstoću između vrijednosti plastike i drva, ali općenito veću gustoću i od drva i od plastike. Svojstva DPK-a izravna su posljedica njegove strukture: oni su prisni spoj čestica drva i plastomera pri čemu plastomer obavija drvo tankim omotačem. Niska higroskopnost DPK-a (upijanje vode od približno 0,7 % u usporedbi sa 17 %

ravnotežne mokrine kod jelovine na otvorenomu prostoru u ljetnim mjesecima), izravan je rezultat strukture. Vodu može upiti samo drvo u vanjskomu dijelu koje je u dodiru s okolinom, ali se ne prenosi kroz plastomernu matricu ili se prenosi neznatno. Kao posljedica DPK-i su izrazito postojani na zračnu vlagu, imaju malu promjenu obujma u vodi i ne podliježu napadu kukaca i plijesni. Pigmenti, UV stabilizatori i veziva mogu se dodati u DPK prije preradbe da se poboljšaju određena svojstva. Općenito govoreći, svojstva DPK-a su sljedeća:

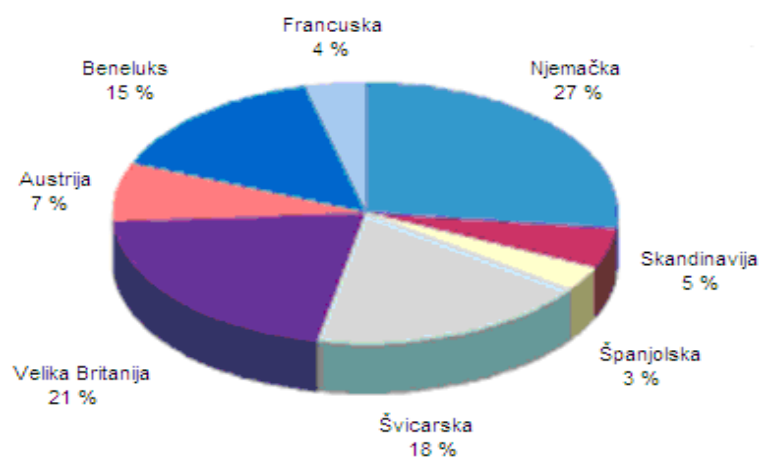
- dobra krutost i žilavost,
- dimenzijska stabilnost,
- otpornost na trulež i plijesan,
- dobra toplinska svojstva,
- niska higroskopnost.

Svojstva DPK-a mogu se prilagoditi zahtjevima proizvoda u uporabi, bilo mijenjajući vrstu drva ili plastomera. DPK bazirani na PE su jeftiniji i mogu se primijeniti pri višim temperaturama nego proizvodi na bazi PVC-a, ali DPK s matricom od PVC-a su pogodniji za završnu obradbu ili bojanje. Također se može promatrati veličina čestica drvnoga brašna, omjer drva i plastomera, postotak veziva i druge tvari koje se može lako promijeniti da bi se ispitao njihov utjecaj na svojstva konačnoga proizvoda. Najčešće se ispituju čvrstoća, bilo savojna ili rastezna, rastezni i savojni moduli, temperatura omekšavanja ili pak dimenzijska stabilnost ovisno o navedenim utjecajima.

U SAD-u je tržište drvno-plastomernih kompozita krajem prošloga i početkom ovoga stoljeća raslo 100 % godišnje, nešto zbog širenja primjene na nove proizvode, a nešto zbog povećanja potražnje za već postojećim proizvodima. Trenutna primjena DPK-a najveća je u građevinarstvu koje mnogostrano iskorištava svojstva DPK-a. DPK se može koristiti za proizvode u kojima su do sada dominirali drvo ili PVC.

Drvno-plastomerni kompoziti osvajaju Europu

Europska proizvodnja drvno-plastomernih kompozita je u 2003. iznosila 30 000 t, što je veliki porast s obzirom na proizvodnju od 3 000 t u 2000. godini. Za razliku od SAD-a gdje je težište primjene drvno-plastomernih kompozita njihova uporaba na otvorenomu te je potrošnja 2003. dosegla gotovo 400 000 t, zamjenske mogućnosti tih kompozitnih materijala u Europi još nisu u potpunosti uočene.



Slika 21. Strukture tržišta za drvno-plastomerne kompozite 2006. u Zapadnoj Europi

Tržište drvno-plastomernih kompozita najviše je razvijeno u Njemačkoj, a u Europi postoji 25 tvrtki koje ih ekstrudiraju.

Na slici 21. prikazana je struktura tržišta za drvno-plastomerne kompozite u zemljama Zapadne Europe u 2006. godini.

8. DRVO

Svojstva drva kao materijala određena su biološkom funkcijom stabla i ona određuje njegova fizikalna, prvenstveno mehanička svojstva ali i nedostatke. Drvo je trajno tkivo u deblima, granama i korijenu stablastih drvenastih biljaka.

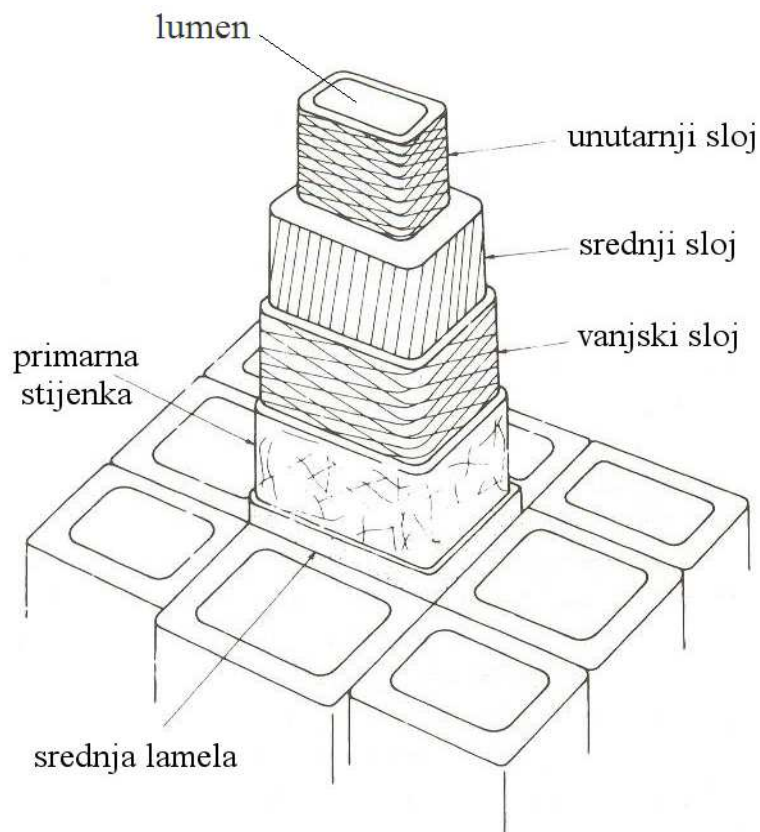
Deblo se sastoji od sljedećih dijelova:

- kora,
- kambij,
- bjeljika,
- srževina.

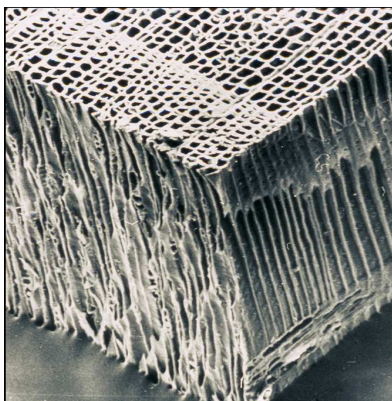
Kambij je tanki sloj ispod kore debla, koji se svake godine dijeli se u dvije ovojnice:

- vanjsku, koja tvori novu koru, i
- unutarnju, koja tvori buduće stanice

Drvenaste stanice imaju funkciju provođenja vode iz korijena u krošnju i hranjivih sastojaka iz krošnje prema dolje. Te su stanice međusobno povezane malim ventilima, jažicama, i zrakastim vodoravnim staničjem, drvnim tracima. Drvo je organizirano u uzdužnom smjeru, odnosno smjeru vlakana, što je izuzetno bitno za longitudinalne funkcije kao što je dovođenje vode, dosizanja svjetlosti, odolijevanje mehaničkim djelovanjima i opterećenjima. Svojom građom pojedine drvenaste uzdužne stanice predstavljaju prirodni kompozit. Sastoje se od nekoliko koncentričnih slojeva koji tvore stijenku središnje šupljine, lumena. Slojevi stjenke nastaju od celuloze, hemiceluloze, lignina i male količine (5-10%) ostalih tvari sadržanih u celulozi. Slikom 22. shematski je predložena građa drvenaste stanice.



Slika 22. Shematski pojednostavljen prikaz stijenke stanice uz orijentaciju mikrofibrila u svakom od slojeva stijenki



Slika 23. Celuloza

Celuloza je uzdužno umreženi polimer, polisaharid, koji nastaje polimerizacijom glukoze uz izdvajanje vode. Uvijen u snopove mikrofibrila, koji se u procesu rasta stanice uvijaju oko lumena i sljepljuju hemicelulozama i ligninom, ali pod različitim kutovima u odnosu na staničnu os. Nastala konstrukcija nalik je sendvič konstrukciji.

Molekule celuloze povezane su relativno čvrstim vodikovim vezama i slabijim Van der Waalsovima. -OH grupe zaslužne za vodikove veze zaslužne su i za higroskopnost – sklonost vezanju vode, što je jedna od važnijih varijabli koja utječe na svojstva drva.

Drvo kao tehnički materijal

Prednosti:

- Visoka estetska vrijednost,
- Visoka specifična čvrstoća,
- Dobra mogućnost lijepljenja, impregnacije i kemijske modifikacije,
- Lagana, jeftina i energijski povoljna obradba i razgradnja,
- Dobra izolacijska svojstva,
- Relativno niska cijena,
- Obnovljivost sirovina,
- Stalna ponuda na tržištu,
- Tradicija u proizvodnji.

Nedostaci:

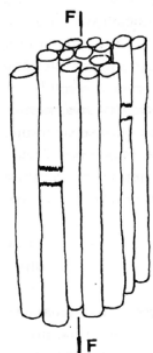
- Dimenzijska ograničenost,
- Neujednačenost kvalitete,
- Anizotropnost,
- Higroskopnost,
- Podložnost vanjskim utjecajima,
- Podložnost biološkoj razgradnji,
- Podložnost gorenju,
- Podložnost mehaničkim i kemijskim oštećenjima.

8.1. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA

Svojstva drva su promjenjiva u uzdužnom i poprečnom smjeru, a ovise i o presjeku gdje se izvodi promatranje. Glavne osobine drva su:

- nehomogenost
- anizotropija
- promjenjivost

Svojstva bitno ovise o prirodi građe, širini godova, sadržaju vode (u higroskopskom području), težini, načinu rasta i greškama (činitelji koji utječu na mehanička svojstva drva).



Slika 24. Vlačno opterećenje vlakana

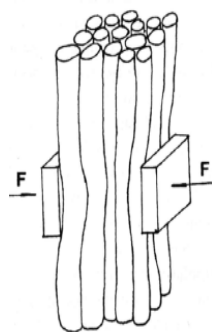
Opterećenje vlačnim silama, odnosno raspodjela opterećenja po svim vlaknima neće biti jednolika (vlakanca popuštaju u različito vrijeme). Zbog slabe međusobne povezanosti puknuta vlakna izdvajaju se iz svežnja – neravan lom (tipičan kod ispitivanja drva na vlak).



Slika 25. Tlačno opterećenje vlakana

Opterećenje tlačnim silama rezultira vlaknima opterećenim na izvijanje (lom nastaje uslijed gubitka stabilnosti elemenata svežnja), a tlačna čvrstoća ispitivanog modela manja je od vlačne.

U smjeru idealnih vlakana vlačna čvrstoća dvostruko veća od tlačne, ali su u konačnici dopušteni naponi iznosi čvrstoća približno su jednaki zbog iznimne osjetljivosti vlačne čvrstoće na kvrgavost, greške, raspukline i neparalelnost vlakana.



Slika 26. Tlačno i vlačno opterećenje okomito na vlakna

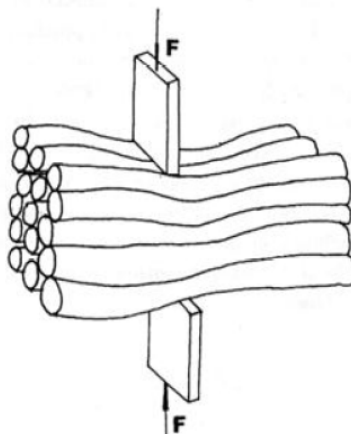
Čvrstoća na vlak i tlak okomito na vlakna znatno su manje nego čvrstoće u pravcu vlakana (posebno je mala vlačna čvrstoća okomito na uzdužnu os svežnja).

U smjeru okomitom na vlakna drvo zadržava 1/50 vlačne i 1/20 tlačne čvrstoće.

Primjetno je kako se uzorak najbolje odupire vlačnim silama, slabije tlačnim silama, a znatno slabije poprečnim akcijama.



Slika 27. Smik u smjeru vlakana



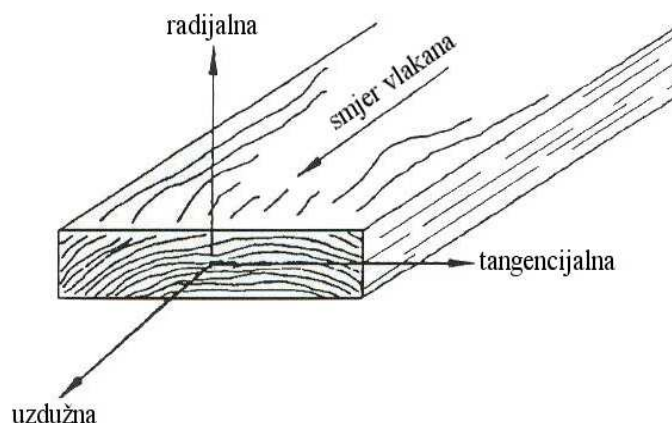
Slika 28. Smik okomito na vlakna

Čvrstoća na smicanje u pravcu vlakana je slaba točka drva (manja od čvrstoća na tlak i vlak paralelno vlaknima), ali i manja od čvrstoće na odrez (smik okomito na vlakana - presijecanje vlakana), pa je u mnogim slučajevima mjerodavna za dimenzioniranje. [9]

Vrsta drva	Gustoća, kg/m ³	Smjer s obzirom na vlakna	Čvrstoća, N/mm ²			
			Vlak	Pritisak	Savijanje	Odrez
BRIJEST	500 do 850	=	60 do 120	30 do 60	50 do 160	7
		⊥	4	10	-	25
BUKVA	500 do 900	=	60 do 180	40 do 80	60 do 180	5 do 20
		⊥	7	10	-	35
GRAB	500 do 850	=	50 do 200	40 do 80	50 do 140	10
		⊥	6	10	-	30
JASEN	500 do 900	=	30 do 220	30 do 60	50 do 180	7
		⊥	7	10	-	-
HRAST	400 do 950	=	50 do 180	40 do 60	70 do 100	5 do 15
		⊥	5	10	-	30
ORAH	600 do 750	=	100	40 do 70	80 do 140	-
		⊥	4	10	-	-
BOR	300 do 900	=	40 do 190	30 do 80	40 do 200	5 do 15
		⊥	3	10	90	20
JELA	300 do 700	=	50 do 120	30 do 50	40 do 100	5
		⊥	2	4	-	25
SMREKA	300 do 700	=	40 do 240	30 do 70	40 do 120	5 do 10
		⊥	3	5 do 10	-	25

Tablica 13. Čvrstoća s obzirom na smjer vlakana pojedinih vrsta drva [2]

Drvo bi se moglo uvjetno opisati kao ortotropni materijal, jer ima neovisna svojstva u tri smjera.



Slika 29. Tri osi kod drva

Rastezni modul

Ovisno o tri osi kod drva se mogu odrediti tri modula uzduž odgovarajućih osi označena kao E_L , E_T i E_R . Rastezni modul pri savojnom opterećenju E_L je najčešće jedini modul koji se stvarno određuje, jer je uzdužni smjer (smjer rasta vlakana) preferirani i može se realno govoriti o anizotropnosti drva. Ima najveći iznos, na koji utjecaj čini botanička vrsta, građa, volumna masa, sadržaj vode, ...

$$E_L = 300 - 2500 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_T = (1/23 - 1/40) \cdot E_L \text{ (u tangencijalnom smjeru)}$$

$$E_R = (1/6 - 1/23) \cdot E_L \text{ (u radijalnom smjeru)}$$

Modul smika

Moduli smika definiraju se kao:

$$G_{LR} = (1/15) \cdot E_L \text{ (radijalna ravnina poprečni presjek)}$$

$$G_{LT} = (1/9 - 1/10) \cdot E_L \text{ (tangencijalna ravnina poprečni presjek)}$$

$$G_{RT} = (1/10) \cdot G_{LR} \text{ (poprečna ravnina)}$$

Žilavost je sposobnost drva da pod vanjskim utjecajima pretrpi deformacije, a da se ne slomi. Žilavost je tim veća što je uočljivija razlika između granice elastičnosti i granice loma.

Tvrdoća je otpor kojeg drvo pruža utiskivanju drugog tijela u svoju masu. Ovisi o botaničkoj vrsti, zapreminskoj masi, količini vlage. Teže drvo iste vrste je tvrđe. S porastom vlage tvrdoća opada. Tvrdoća je najveća u poprečnom presjeku.

Otpornost na habanje je odupiranje postupnom skidanju slojeva pod utjecajem mehaničkih sila. Mjeri se debljinom skinutog sloja.

Utjecaj temperature na mehaničke osobine drva

Povišenjem temperature

- čvrstoća se smanjuje, a puzanje povećava
- smanjuje se rasetzni modul, a raste deformacija
- nepovoljan utjecaj temperature povećava kvrgavost i otklon vlakanaca, pa kod visokih temperatura na tim mjestima može doći do pucanja drva

Smrzavanjem drva

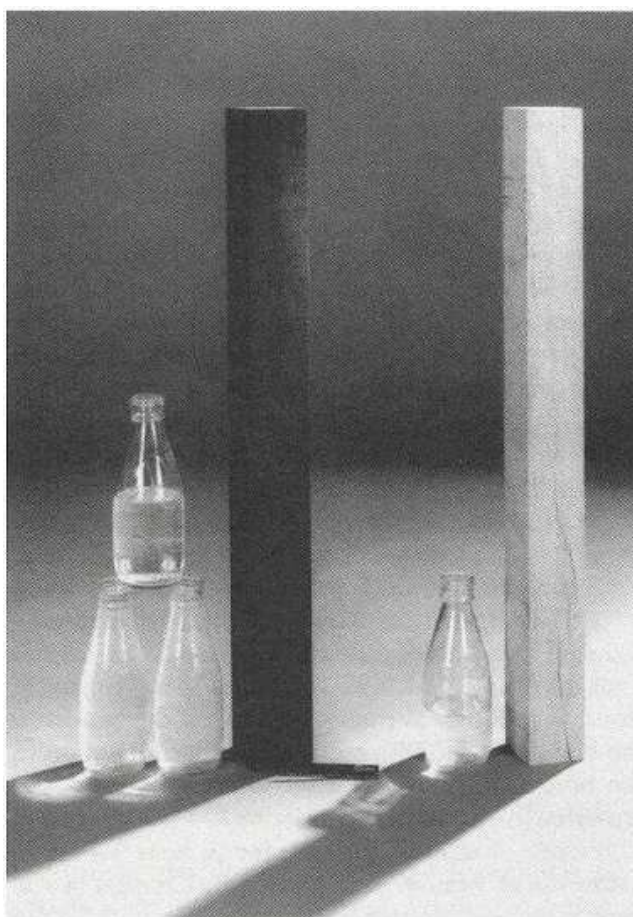
- rastu mehaničke osobine, ali i krhkost (malen otpor savijanju kod opterećenja većeg intenziteta)

Umjetno sušenje

- ako se naglo provodi loše utječe na mehanička svojstva (raspucalost)
- ako je provedeno postupno i pod posebnim režimom, utjecaj temperature je bez posebnog značaja na mehanička svojstva.

8.2. SADRŽAJ VODE (VLAGE)

Sadržaj vlage definiran je kao masa vode u drvu (izražena u %) u odnosu na suho drvo. U živim stablima kreće se od 30% pa sve do preko 200% u odnosu na drvenu tvar te o njemu ovise težina, skupljanje i ostala svojstva drva.



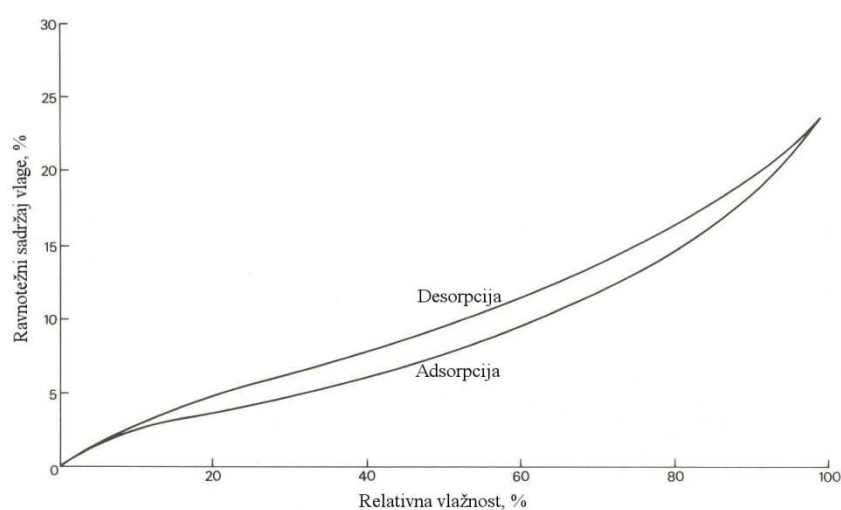
Slika 30. Količina vode u drvu

lijevo: hrast (750x70x70 mm) – svježe odrezan

desno: hrast (750x70x70 mm) – sušen do sadržaja vode 12 %

Voda je u drvu prisutna na 2 načina:

- Slobodna voda (kapilarna):
 - njeno uklanjanje sušenjem ne utječe na svojstva drva
- Vezana voda:
 - higroskopna
 - kemijski vezana uz konstituente stijenke ćelija (vodikove veze). Sadržaj varira ovisno o pritisku para okoline. Kemijski vezana voda ne isparava. Ona se može osloboditi posebnim postupcima uz visoku temperaturu (180 °C).



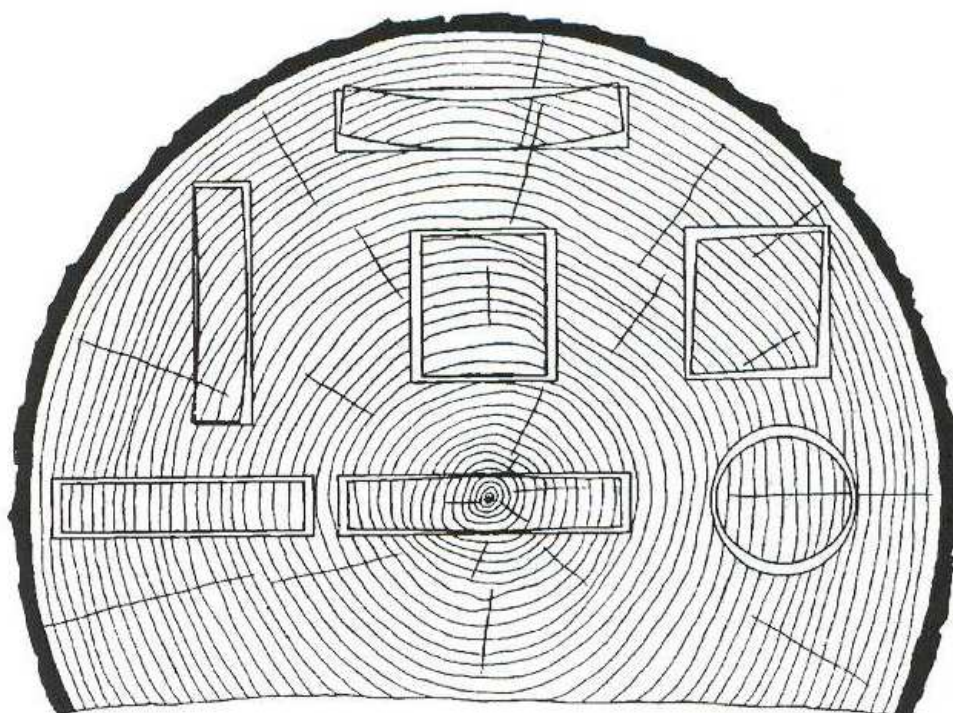
Slika 31. Krivulja histereze za običnu adsorpciju – desorpciju pri 40 °C

Točka zasićenja vlakna podrazumijeva vlažnost koja odgovara isparenju slobodne vode, a mijenja se obrnuto proporcionalno povišenju temperature (povećanje temperature za 1°C smanjuje vlagu za 1%).

Higroskopna ravnoteža jest ravnoteža vodene pare u zraku određene temperature i količine vode u stijenci drva, a higroskopno područje kreće se do približno 30 % vlažnosti. Drvo isparava, odnosno, upija vodenu paru samo do stanja u kojem je pritisak vodene pare okoline u ravnoteži s pritiskom u kapilarama. U slučaju pritiska u kapilarama većeg od pritiska higroskopne ravnoteže dešava se isparavanje

(desorpcija), dok se pri pritisku u kapilarama manjem od pritiska higroskopske ravnoteže zbiva upijanje (adsorpcija). Upijanje vlage uzrokuje pad čvrstoće drva te drvo sa 40% vlage ima oko 2/3 rasetzne i 1/2 tlačne čvrstoće od drva sa 10% vlage).

Drvo je dimenzijski stabilno kada je sadržaj vlage veći od točke zasićenja vlakana, odnosno kad su zasićene samo stijenke stanica drva, ali ne i stanice lumena. Ako drvo prima ili gubi vlagu ispod te točke dolazi do promjene dimenzija. Ta sposobnost drva da kod promjene vlage u određenim granicama mijenja volumen, što je povezano s količinom higroskopske vode, jest skupljanje, odnosno bubrenje drva. Drvo se steže uglavnom u smjeru godova (tangencijalno), upola manje uzduž prstenova (radijalno) i samo malo longitudinalno. Stezanje započinje oko točke zasićenja vlakana i nastavlja se skoro linearno do skoro potpuno suhog drva.



Slika 32. Karakteristično stezanje i deformacija plosnatog, kvaratičnog i okruglog presjeka ovisno o smjeru prstenova rasta

Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost je mjera za brzinu tijeka topline kroz jedinicu debljine materijala. Vodljivost topline ovisi o vlazi (proporcionalno) i težini drva. Vodljivost je veća u smjeru, nego poprijeko na vlakanca. Drvo ima 400 puta veći otpor prolazu topline od čelika, 10 puta u odnosu na beton, i 5 puta u odnosu na opeku.

Materijal	Toplinska vodljivost, W/ (mK)
Drvena greda s 12% vlage	0,1 -1,4
Al	216
Čelik	45
Beton	0,9
Staklo	0,7
Mineralna vuna	0,036

Tablica 14. Toplinska vodljivost nekih materijala

Električna svojstva

Suho drvo je izuzetno slab vodič električne struje (pruža veliki otpor).

Akustična svojstva

Apsorpcija zvuka je svojstvo drva da upija zvuk. Dobra akustična svojstva drva razlog su njegove česte upotrebe kao materijala za oblaganje zidnih i podnih ploha.

Kemijska postojanost

Najvažniji faktori koji određuju dobru kemijsku postojanost drva su njegova relativna nepropusnost i gustoća. Postojanost na kisele medije je bolja od većine metala. Osjetljivo je na jake oksidirajuće medije koji razaraju drvo, prvenstveno lignin.

Oksidacijska degradacija

Slobodni kisik izaziva oksidaciju površinskih slojeva celuloze, što utječe na skraćivanje vlakana.

Gorenje

Opasne su uglavnom temperature iznad 100°C. Niže temperature izazivaju skraćenje celuloznog vlakna i promjenu boje. Na temperaturama iznad 220°C počinje karbonizacija, a pri 260-300°C sagorijevanje.

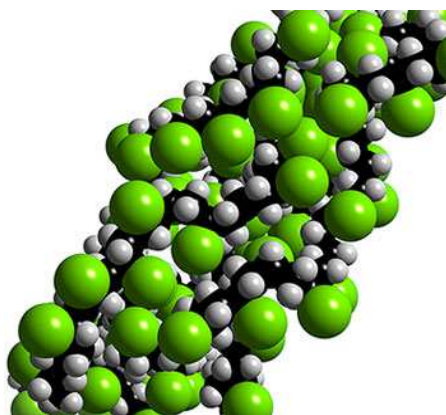
Biološko djelovanje

Mnogim organizmima, insekti i gljive, drvo predstavlja izvor hranjivih tvari ili stanište. Iako su biotička djelovanja spora mogu u potpunosti razložiti drvo. Važan je i utjecaj vlage. Drvo je praktički otporno na gljive ukoliko sadrži manje od 20% vlage.

9. ŠUPLJIKAVI MATERIJALI

9.1. POLI (VINIL-KLORID)

Poli(vinil-klorid) (PVC) je naziv za grupu plastomera koji sadrže makromolekule sa poznavajućim jedinicama $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$. Svojstva osnovnog polimera mogu se lako mijenjati procesima modifikacije, tako da je poznato preko stotinu vrsta polimernih materijala na osnovi vinil-klorida. Oni se razlikuju po procesima proizvodnje, vrsti i količini prisutnog plastifikatora ili udjela komonomera, pa se njegova fizikalna svojstva mijenjaju od mekanog i elastomernog do tvrdog i žilavog materijala. Zahvaljujući dobroj kompatibilnosti sa plastifikatorima i drugim dodacima, laganoj preradljivosti i niskoj cijeni, PVC je najsvestraniji i volumno najviše korišteni plastični materijal sa veoma širokim područjem primjene.



Slika 33. 3D Prikaz lanca PVC-a

Prerada i primjena PVCa

PVC se lako prerađuje svim uobičajenim postupcima prerade plastomera, a najviše se primjenjuje ekstrudiranje i kalandiranje, zatim injekcijsko prešanje, puhanje i vakuumsko formiranje. Zaštitne prevlake nanose se iz otopina ili izravno sinteriranjem praha. Temperatura prerade iznosi od 140 do 190°C a polimer se mora prvo sušiti.

Neplastificirani, tvrdi PVC poboljšane je otpornosti na utjecaj atmosferilija i smanjene je gorivosti, što omogućuje njegovu primjenu kao konstrukcijskog materijala za vanjske građevinske elemente. Mala propusnost za vlagu i plinove omogućuje nadasve široku primjenu.

PVC se lako prevodi u pjenasti materijal. Proizvodi se tako da se praškastom PVCu primješa 1 do 2% nekog prikladnog kemijskog spoja (pjenila) koji na povišenoj temperaturi od 180 do 220°C svojim raspadanjem stvara veliku količinu internog plina, obično dušika ili ugljen-dioksida, kojim se materijal ekspandira.

9.2. ŠUPLJIKAVI PROIZVODI

Po svom obujmu šupljikave tvorevine čine najrasprostranjeniju skupinu polimernih tvorevina jer njihova gustoća može biti od 1,2 do 20 % kompaktnoga proizvoda.

Te su tvorevine jedinstvenih svojstava, prema kojima se bitno razlikuju od onih načinjenih od ostalih materijala ili nešupljikavih proizvoda. Proizvodnja šupljikavih polimernih tvorevina ima svoje uzore u prirodnim šupljikavim proizvodima poput spužva, drveća, kostiju i šupljikavoga kamenja od lave.

Osnove proizvodnje šupljikavih tvorevina

Razvoj umjetnih šupljikavih polimernih tvorevina uvjetovan je, među ostalim, i optimiranjem omjera svojstava proizvoda i njegove cijene. Za postizanje tog cilja vrlo su se pogodnima pokazali šupljikavi proizvodi. Razvijen je niz postupaka kojima je svrha pravljenje takvih proizvoda od većine skupina polimera.

Kriteriji klasifikacije proizvodnje šupljikavih tvorevina

Moguće je navesti sljedeće kriterije klasifikacije proizvodnje šupljikavih tvorevina:

- broj šupljina u tvorevini,
- presjek tvorevine,
- stupanj krutosti,
- vrsta upotrijebljenoga polimera,
- gustoća otpjenka,
- polazno stanje polimera,
- postojanje kemijske(ih) reakcije(a),
- visina tlaka preradbe,
- vrsta proizvodnje.

Podjela otpjenaka prema presjeku i krutosti

Pjenaste tvorevine, otpjenci, mogu biti normalne, kožuričaste i sendvičaste. Normalni su otpjenci oni s otvorenim ćelijama, a integralni ili kožuričasti otpjenci načinjeni su od jednoga materijala te imaju kompaktnu površinu i pjenastu unutrašnjost. Sendvičaste su pjenaste tvorevine načinjene od dva ili više materijala, pri čemu su površinski slojevi kompaktni, a unutrašnjost je pjenasta.

Pjenaste tvorevine razlikuju se i prema stupnju krutosti; mogu biti krute, savitljive i polusavitljive. U proizvodnji šupljikavih tvorevina rabe se duromeri, elastomeri i plastomeri, a njihovo polazno stanje može biti čvrstina, taljevina ili ostali oblici kapljevina. Proizvodni postupci mogu biti ciklički ili kontinuirani.

Podjela prema gustoći

Razlikuju se plastomerni otpjenci visoke i niske gustoće. Otpjenci visoke gustoće su oni kojih je gustoća od 75 do 90 % kompaktnoga materijala i upotrebljavaju se za trajnije konstrukcijske dijelove namještaja i vozila, u građevinarstvu itd. Otpjenci niske gustoće upotrebljavaju se za zvučne i toplinske barijere, apsorbiraju udarce (pakovanja) ili se koriste ondje gdje je potrebna plutavost (pomorska tehnika). Mogu biti kruti ili savitljivi, gustoće 1,2 (npr. EP pjene) do 20 % kompaktnoga proizvoda.

Podjela prema ulazu u proces

Prema ulazu u proces razlikuju se šupljikavi proizvodi načinjeni od prirodnina (nafta, prirodni plin) i uzgojina (npr. za polioliol > različita ulja: ricinusovo, sojino, kikiriki i *canola*)

Podjela prema vrsti kemijskih reakcija

Prema vrstama kemijskih reakcija postupci proizvodnje šupljikavih tvorevina mogu biti:

- *bez kemijske reakcije* polimeriziranja i/ili umreživanja (nereakcijski postupci, npr. injekcijsko prešanje integralnih pjenastih otpresaka s izravnim uplinjavanjem ili ekstrudiranih pjenastih profila)
- *uz kemijske reakcije* (reakcijski postupci, npr. reakcijsko injekcijsko prešanje integralnih poliuretanskih pjenastih otpresaka – *RIM*).

Otpjenci se mogu praoblikovati postupcima kontinuiranoga i cikličkoga praoblikovanja.

Najvažniji su postupci pravljenja otpjenaka

- *ekstrudiranje* (npr. PUR, PS, PE, PVC, smjese s drvenim punilima itd.),
- *injekcijsko prešanje* (PS, PUR),
- *parno pjenjenje* (PS, PE, PUR, PVC, EP, PF itd.),
- *sraščivanje* (rotacijsko kalupljenje PS-a, PE-a i PTFEa),
- *štrcanje* (PUR, EP, UP itd.),
- *izravno prešanje* (PE, PVC, UP itd.),
- *kalandriranje* (kaučukove smjese, PVC, PET i elastoplastomeri, debljina kalandrata > 3 mm, gustoća 0,5 g/cm³),
- *zapjenjivanje* (stvaranje fine guste pjene, a prave se otpjenci od PURa, PVC-a, EP-a, UP-a itd.),
- *ispiranja* (PE, PVC, CA). Od pjenastih priprema prave se toplo oblikovani i puhani proizvodi.

Podjela prema visini tlaka preradbe

Proizvodnja šupljikavih tvorevina zahtijeva odgovarajući tlak preradbe.

Prema visini djelujućeg tlaka preradbe postoje sljedeće skupine postupaka:

- *visokotlačni postupci* (npr. endotermno injekcijsko prešanje integralnih pjenastih otpresaka)
- *srednjotlačni postupci* (npr. klasični postupak injekcijskoga prešanja integralnih pjenastih otpresaka)
- *niskotlačni postupci* (npr. injekcijsko prešanje integralnih plastomernih pjenastih otpresaka s uronjenim bridom kalupa ili rotacijsko kalupljenje integralnih otpjenaka)
- *podtlačni postupci* (npr. podtlačno parno pjenjenje PS-E-a).

Sistematika proizvodnje i obilježja pjenastih tvorevina

Polimerni otpjenci nastaju uvođenjem pjenila uz kemijsku reakciju ili bez nje, koje stvara strukturu koja se bitno razlikuje od one masivnih (kompaktnih) tvorevina. Njihov se kostur sastoji od finih membrana, što su ujedno i stijenke ćelija raspoređenih po cijeloj tvorevini. Ćelije su ispunjene zrakom ili nekim drugim plinom i mogu biti različitih veličina, otvorene ili zatvorene.

Nužna je još jedna podjela pjenastih tvorevina. Ta podjela uzima u obzir je li otpjenak dobiven fizičkim ili kemijskim pjenilom. Pjenila se dodaju reakcijskoj smjesi (npr. poliuretanske pjene), pri lančanoj polimerizaciji (npr. pjeneći polistiren) ili tijekom postupka praoblikovanja. Čvrsta pjenila otpuštaju plin (ugljikov dioksid) pri temperaturi preradbe. Kapljevite tvari, npr. ugljikovodici niskoga vrelišta i halogenirani ugljikovodici, topive su u smjesi, a pri temperaturama preradbe isparavaju. Plinovita pjenila (dušik, ugljikov dioksid) upuhuju se pod tlakom u rastaljeni materijal ili polimerizirajuću tvar, a mogu se u reakcijskoj smjesi pojaviti i kao jedan od proizvoda reakcije polimeriziranja. U suvremenoj proizvodnji pjena izbjegavaju se sva pjenila koja na bilo koji način utječu na okoliš i prirodu (npr. CFC – klorfluor-ugljikovodici).

Među pjenastim polimernim tvorevinama najvažnije su one od poliuretana i polistirena. Ostale pjenaste tvorevine prave se od poli(vinilklorida), polietilena, polipropilena i još nekih plastomera te karbamidnih, fenol-formaldehidnih, poliesterskih i epoksidnih smjesa te smjesa na osnovi kaučuka.

Neka od svojstava pjenastih tvorevina

Najvažnija i često jedinstvena svojstva polimernih pjenastih tvorevina jesu:

- niska gustoća,
- niska toplinska provodnost,
- vrlo nizak specifični toplinski kapacitet,
- pogodna mehanička svojstva,
- visoka kemijska postojanost,
- dobra zvučna izolacija,
- plutavost,
- izvrsna i raznovrsna obradljivost,
- izvrstan omjer čvrstoće i težine otpjenka.

Zbog stlačenoga plina u ćelijama, pjene posjeduju sposobnost apsorpcije visoke razine energije bez prenošenja na podlogu. To omogućuje uporabu pjenastih tvorevina kao pakovanja i za najosjetljivije uređaje. Uporaba otpjenaka proširena je na mnogim područjima. Osim već navedenih pakovanja, rabe se u građevinarstvu, industriji namještaja i vozila, u sportu i unutarnjem uređenju prostorija, za izradbu odjeće i obuće te najraznovrsnije zvučne, toplinske i rashladne izolacije itd.

Neka od svojstava otpjenaka mogu se poboljšati raznim dodacima, npr. ojačavalima, ili se ćelije ispune toplinskim izolatorima u obliku staklenih ili plastičnih mikrokuglica promjera od 5 do 100 μm (sindiotaktni otpjenci).

Teorijske osnove pjenjenja

Prave li se pjenaste tvorevine jednim od reakcijskih postupaka preradbe, materijal nastaje tek nakon završetka kemijskih reakcija, čemu je prethodilo praoblikovanje. U tom su slučaju svojstva pjenastoga materijala ujedno uporabna svojstva pjenaste tvorevine.

Teško je općenito karakterizirati pjenaste materijale, pjene, jer su prema svome podrijetlu vrlo različiti. Pjene su disperzijski sustavi koji slijede određene zakonitosti stvaranja ćelija, a pripadaju području koloidne kemije. Koloidni su sustavi smješteni prema svojim karakteristikama između pravih otopina (npr. otopina šećera u vodi) i suspenzija ili emulzija kod kojih su čestice dispergirane i toliko velike da su vidljive golim okom. Stoga se naziv koloidno stanje može primijeniti na svaku slabo topivu tvar.

Svaki se koloidni sustav sastoji od dvije faze: disperzne faze, koju čine čestice, i dispergatora (disperznoga sredstva) u kojem se čestice raspoređuju. Dispergator i disperzna faza mogu biti kapljeviti, čvrsti ili plinoviti pa postoje mnogobrojne kombinacije koloidnih sustava. Dim i prašina primjer su otopljenoga čvrstog tijela u plinu, dok su magla i kapljice kondenzirane pare na prašini primjer kapljevina dispergiranih u plinu. U prirodi postoje mnogobrojni primjeri dispergiranih plinova, kapljevina i čvrstih tvari u čvrstoj fazi. Pjene su takvi sustavi gdje je jedna faza plinovita, a druga kapljevita ili čvrsta. Pritom nije od važnosti činjenica da je tijekom dijela procesa plin dispergiran u kapljevini.

U nastavku su razmatrane pjene kod kojih je plin dispergiran u čvrstini. Pritom je dispergator polimerna tvar, a disperzna je faza plinovita i čine ju jedan ili više plinova.

Kao dispergator se rabe umreživi polimeri kao što su poliuretani, epoksidi, fenol-formaldehidi te prirodni i sintetski kaučuci. Od plastomera se upotrebljavaju polistiren, polietileni, polipropilen i poli(vinil-klorid). Disperzna je faza plinovita ili kapljevita (npr. voda). Ako je disperzna faza zatvorena u ćelijama, riječ je o zatvorenim ćelijama; slobodno gibanje disperzne faze između ćelija obilježje je otvorenih ćelija. Ne postoje pjene s potpuno zatvorenim ili potpuno otvorenim ćelijama.

Posebnu skupinu čine pjene kod kojih su u polimernu matricu raspršene, dispergirane, šuplje staklene ili plastične kuglice. Takve se pjene nazivaju sindiotaktnima.

Polimerne se pjene prave od reakcijski sposobnih sastojaka, plastomerne taljevine ili pjenećih čestica. Postupci proizvodnje temelje se na mehaničkome miješanju ili komešanju, kemijskim procesima stvaranja ćelija s pomoću reakcijskih tvari koje stvaraju plinove te fizičkim postupcima (otapanjem inertnih plinova u polimeru, stvaranjem ćelija sniženjem tlaka, isparavanjem kapljevitoga sastojka tijekom razvijanja topline).

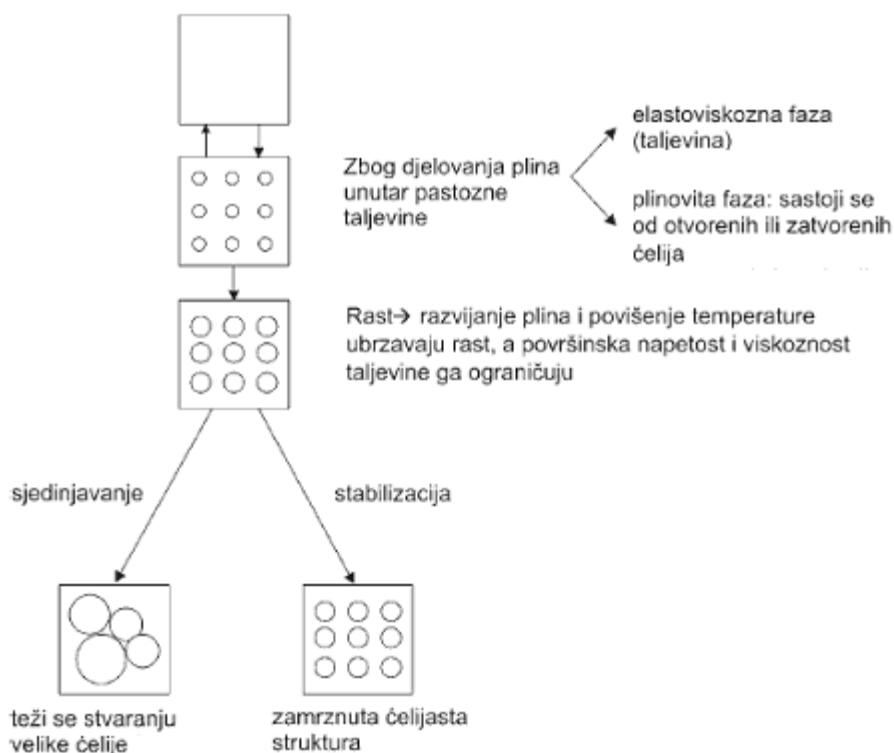
Neovisno o procesu nastajanja, stvaranje ćelija moguće je podijeliti u tri faze

- nastanak ćelija,
- rast ćelija,
- učvršćivanje ćelija.

Za stvaranje klica potrebna je velika energija. Slobodna energija prijelaza iz kapljevitoga u plinovito stanje mora biti veća od potrebnoga rada stvaranja mjehura

Rast mjehura sprječavaju površinska napetost, viskoznost i tromost kapljevine. Polumjer mjehura obrnuto je proporcionalan tlaku plina. Stoga se dva susjedna mjehura različitih veličina nastoje sjediniti.

Daljnje razvijanje plina i povišenje temperature malo pridonose stvaranju novih ćelija, oni povećavaju obujam postojećih. Povišenjem viskoznosti smanjuje se polumjer mjehura, što znači da je mehaničko pjenjenje ograničene mogućnosti stvaranja ćelija. Nastale ćelije moraju se stabilizirati površinski aktivnim tvarima. Zbog prisutnosti plina u ćelijama opada čvrstoća pjenastih tvorevina. Analiza deformacija pjenastih profila pokazuje, međutim, mogućnost postizanja izvrsnoga omjera između mase profila i njegove krutosti.



Slika 34. Stvaranje ćelija kod integralnih polistirenskih pjenila [10]

10. ISPITIVANJE

.10.1. UVOD

Kompoziti predviđeni za ispitivanje jesu drvno-polimerni strukturni, preciznije slojeviti kompoziti komercijalnog imena „Deltex“. Strukturni kompoziti, koji podrazumijevaju slojevite, stanične i sendvič kompozite, ponajprije su korišteni pri proizvodnji brzih brodova i to za tzv. „strukturne“ i „nestrukturne“ dijelove. Nazive „strukturni“ i „nestrukturni“ može se objasniti, odnosno preimenovati na sljedeći način. „Strukturni dijelovi“ su oni koji su u uporabi izrazito mehanički opterećeni, tj. dijelovi kod kojih je pri izboru materijala i pri dimenzioniranju prioritetno udovoljavanje zahtjevima koji su povezani s mehaničkim opterećenjem. „Nestrukturni dijelovi“ su oni kod kojih su prioritetni zahtjevi u pogledu dekorativnosti (estetičnost, boja itd.), samogasivosti, kemijske postojanosti, postojanosti pri utjecaju atmosferilija itd.

Materijali podvrgnuti ispitivanju jesu slojeviti kompoziti koji spadaju u skupinu korištenu za izradu „nestrukturnih dijelova“ broda. „Deltex“ palubna obloga je kompozitni laminat kod kojeg je 2-2,5 mm mahagonij ili tikov furnir vakuumskom tehnologijom zalijepljen na ploču upjenjenog PVC-a debljine 5 mm. Tikove trenice široke su 40 mm, a fuga je širine 4 mm i popunjena je protukliznim bijelim „Sikaflexom 295 UV“ ili crnim „Sikaflexom 290 DC“, jednokomponentnim poliuretanskim brtvilom s visokom UV-postojanošću, posebno formuliranim za fugiranje klasičnih drvenih paluba. Ta brtvena masa otvrdnjava stvarajući fleksibilni elastomer koji se može brusiti, ne uzrokuje koroziju, otporan je na UV zrake i atmosferilije, slatku i morsku vodu. Proizvod je namijenjen oblaganju vanjskih površina na plovilima, kao i u unutrašnjosti brodova gdje je poželjno osigurati protukliznost radi prisustva vode. Lijepi se na sve podloge poliestrom, epoksidom ili odgovarajućim konstrukcijskim ljepilom.



Slika 35. Materijali Deltex

Glavni konstituenti jednog kompozita jesu ploča upjenjenog PVC-a proizvođača „Vekaplast“ i furnir mahagonija debljine 2,5 mm, a drugog, također, ploča PVC-a i furnir tikovine iste debljine. Ljepilo „Kleiberit 501“ upotrijebljeno za spajanje ploča ispitivanog slojevitog kompozita jest poliuretansko jednokomponentno ljepilo s visokom otpornosti na utjecaj vode i temperature. Široke je primjene; koristi se za lameliranje prozora i lijepljenje spojeva vrata, za povezivanje drvenih laminata, medijapan ploča i ploča izrađenih od minerala, za spajanje keramičkih i betonskih materijala te tvrde pjene. Prednosti ovog ljepila jesu jednokomponentnost, jednostavna aplikacija i relativno kratko vrijeme otvrdnjavanja. Spoj proizveden ovim ljepilom odlikuje se izuzetno dobrom otpornošću na visoku temperaturu i vremenske uvjete. Veziva snaga mu je iznimna. Ljepilo je spravljeno na bazi izocijanata. Žuto-smeđe boje je, specifične težine od otprilike 1.13 g/cm^3 i srednjeg viskoziteta.

Idealni uvjeti za provođenje procesa lijepljenja jesu radna temperatura od 20°C i vlaga u drvu između 8 i 12 %. Ploče koje lijepimo moraju biti očišćene, suhe i odmašćene. Ljepilo se nanosi na samo jednu površinu i to onu manje poroznu i pomoću valjka se raspoređuje. Sugerirana količina je 100 do 200 g/m^2 . Nakon nanošenja ljepilo bi trebalo odstajati 20 do 25 minuta na temperaturi oko 20°C . U slučaju povišene temperature i vlažnosti taj period se skraćuje. Ljepilo otvrdnjava u vodootporan polutvrd film otporan na otapala. Proces umrežavanja može se ubrzati s dodatnim snabdijevanjem vlagom pomoću finog raspršivača i količine vode od otprilike 20 g/m^2 ili povišenjem temperature do maksimalnih 70°C . Kako bi osigurali zadovoljavajući kontakt dvaju materijala potrebno je osigurati dovoljan pritisak, koji

ovisi o vrsti i veličini materijala, pri spajanju. Ovaj ispitivani materijal u vakuumu pri tlaku od -0,6 do -0,7 i više (do -0,9 bara). Vrijeme pritiska, naravno, ovisi o temperaturi i opskrbi vlagom. Za temperaturu od 20°C iznosi oko 60 minuta, za 40°C oko 30 minuta, a za temperaturu 60°C otprilike 10 minuta.

Za provođenje ispitivanja važno je bilo prirediti adekvatne epruvete. Proizvedene su izrezivanjem na dimenziju određenu normom za ispitivanje prividne međuslojne čvrstoće EN ISO 14130. Duljina i debljina ispitka trebaju imati odnos: $l = 10h$. Širina ispitka mora iznositi $b = 5h$.



Slika 36. Uzorak kompozita mahagonij-PVC



Slika 37. Uzorak kompozita tikovina-PVC

.10.2. ODREĐIVANJE UPIJANJA VODE

Pet ispitaka mahagonij-PVC kompozita i pet ispitaka tik-PVC kompozita bili su uronjeni u destiliranu vodu i još pet jednih i drugih u morsku vodu, gdje su proveli 29 dana u komori u kojoj smo pomoću termostata održavali temperatura 50 °C.



Slika 38. Uzorci u kadicama s destiliranom i morskom vodom



Slika 39. Kadice s uzorcima u termostatu.

Prije uranjanja određena je masa svih ispita koji će biti podvrgnuti 29-dnevnom djelovanju medija. Promjena mase bilježena je u ciklusima 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 21, 29. dan što je propisano normom. Mjerenje je provedeno vaganjem analitičkom vagom.



Slika 40. Analitička vaga

Ispitak se nakon vađenja iz vode, a prije vaganja trebao dobro obrisati kako zaostala voda na površini ne bi negativno utjecala na rezultate mjerenja upijanja. Nakon vađenja iz vode i brisanja mjerenje se mora izvesti što prije da ne bi došlo do isparavanja vode iz ispita. Ovim načinom bilježi se količina prividno apsorbirane vode, što daje uvid u realno stanje kompozita u uvjetima primjene, dok se količina stvarno apsorbirane vode određuje nakon sušenja ispita i karakteristična je za određeni kompozit. Rezultati praćenja promjene mase prikazani su tablicama 15., 16., 17. i 18.

		16.03.2009. početno stanje, g	17.03.2009. 1. dan ΔG, g	18.03.2009. 2. dan ΔG, g	19.3.2009 3. dan ΔG, g	21.03.2009. 5. dan ΔG, g	23.03.2009. 7. dan ΔG, g	26.03.2009. 10. dan ΔG, g	30.03.2009. 14. dan ΔG, g	06.04.2009. 21. dan ΔG, g	14.04.2009. 29. dan ΔG, g
mahagonij-PVC u destiliranoj vodi	1	12,2042	13,6212	14,0752	14,3222	14,5904	14,8062	15,1055	15,3412	15,6443	15,7864
	2	12,0292	13,4720	13,9043	14,1143	14,4263	14,6464	14,9154	15,1621	15,4122	15,5222
	3	12,3792	13,7861	14,2253	14,4545	14,7624	14,9853	15,2574	15,4854	15,7837	15,8923
	4	12,2675	13,6932	14,1200	14,3363	14,6423	14,8455	15,1256	15,3782	15,6182	15,7342
	5	11,7327	13,1621	13,6154	13,8642	14,2074	14,4414	14,7043	14,8800	15,0048	15,0661
	S	12,1226	13,5469	13,9880	14,2183	14,5258	14,7450	15,0216	15,2494	15,4926	15,6002

Tablica 15. Promjene mase mahagonij-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u destiliranu vodu

		16.03.2009. početno stanje, g	17.03.2009. 1. dan ΔG, g	18.03.2009. 2. dan ΔG, g	19.3.2009 3. dan ΔG, g	21.03.2009. 5. dan ΔG, g	23.03.2009. 7. dan ΔG, g	26.03.2009. 10. dan ΔG, g	30.03.2009. 14. dan ΔG, g	06.04.2009. 21. dan ΔG, g	14.04.2009. 29. dan ΔG, g
mahagonij-PVC u morskoj vodi	1	11,6074	12,8011	13,0963	13,1642	13,4134	13,5764	13,8953	14,1155	14,4764	14,6472
	2	11,8513	13,0142	13,3092	13,4044	13,6365	13,8716	14,2182	14,4554	14,7932	15,0544
	3	12,2916	13,5213	13,7873	13,8535	14,0652	14,2756	14,5424	14,8333	15,1562	15,3651
	4	11,8313	13,0644	13,3212	13,3600	13,5546	13,7792	14,0932	14,3470	14,6973	14,8732
	5	11,7513	13,0032	13,2764	13,3292	13,5453	13,7632	14,0682	14,2852	14,6191	14,8322
	S	11,8666	13,0808	13,3581	13,4223	13,6430	13,8532	14,1635	14,4073	14,7484	14,9544

Tablica 16. Promjene mase mahagonij-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u morsku vodu

		16.03.2009. početno stanje, g	17.03.2009. 1. dan ΔG , g	18.03.2009. 2. dan ΔG , g	19.3.2009 3. dan ΔG , g	21.03.2009. 5. dan ΔG , g	23.03.2009. 7. dan ΔG , g	26.03.2009. 10. dan ΔG , g	30.03.2009. 14. dan ΔG , g	06.04.2009. 21. dan ΔG , g	14.04.2009. 29. dan ΔG , g
tikovina-PVC u destiliranoj vodi	1	9,5660	11,9112	12,5910	13,0152	13,3575	13,8645	14,2557	14,9503	15,6174	16,2815
	2	8,8808	11,0733	11,9762	12,3812	13,0447	13,5375	14,0033	14,5011	15,1446	15,3873
	3	8,7415	11,3052	12,2712	12,6702	13,2183	13,7764	14,1834	14,8232	15,2645	15,6587
	4	8,9388	11,1831	12,1042	12,6214	13,2233	13,7968	14,2023	14,8068	15,2058	15,7473
	5	9,0432	11,4253	12,4742	13,0566	13,5052	14,0455	14,3040	14,8867	15,1764	15,8054
	S	9,0341	11,3796	12,2834	12,7489	13,2698	13,8041	14,1897	14,7936	15,2817	15,7760

Tablica 17. Promjene mase tikovina-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u destiliranu vodu

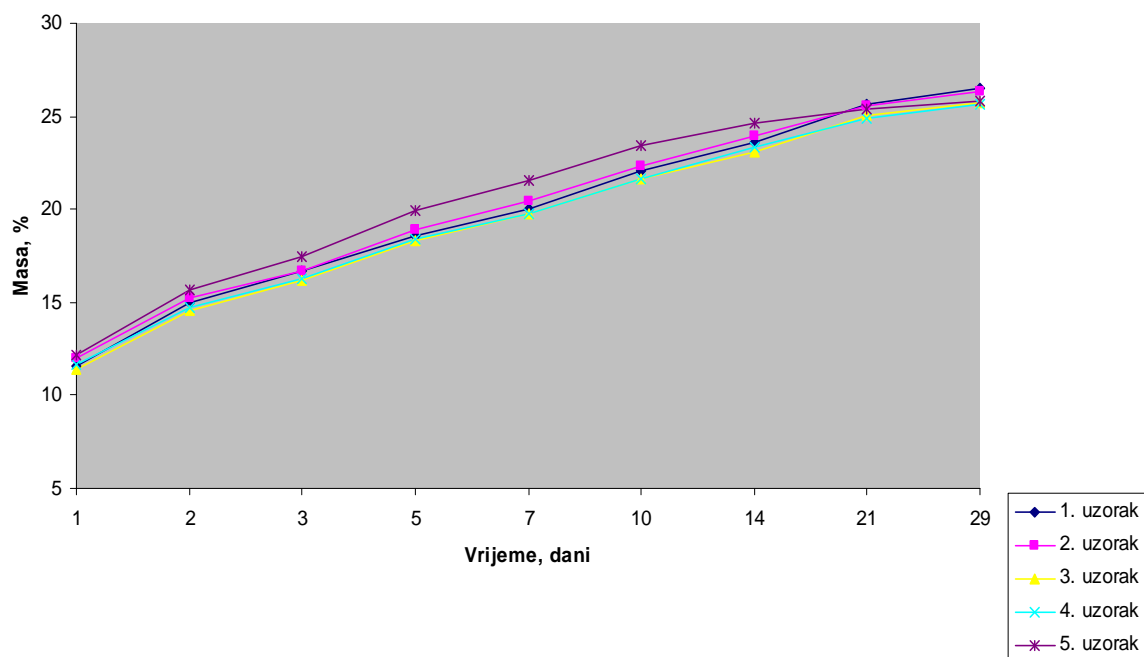
		16.03.2009. početno stanje, g	17.03.2009. 1. dan ΔG , g	18.03.2009. 2. dan ΔG , g	19.3.2009 3. dan ΔG , g	21.03.2009. 5. dan ΔG , g	23.03.2009. 7. dan ΔG , g	26.03.2009. 10. dan ΔG , g	30.03.2009. 14. dan ΔG , g	06.04.2009. 21. dan ΔG , g	14.04.2009. 29. dan ΔG , g
tikovina-PVC u morskoj vodi	1	9,3172	11,1342	11,7263	11,9183	12,4615	12,8682	13,6504	13,9154	14,9164	15,5558
	2	8,7831	10,7901	11,5172	11,7912	12,3468	12,8294	13,5319	14,0444	14,6442	15,0164
	3	9,1277	11,0054	11,7273	12,0835	12,6473	13,0663	13,7514	14,1818	14,9871	15,3366
	4	9,0341	10,9783	11,7091	12,1226	12,6754	13,1770	13,8352	14,2564	14,9623	15,3752
	5	9,5211	11,4582	12,2065	12,6147	13,0858	13,4382	13,9381	14,4423	15,5172	16,2270
	S	9,1566	11,0732	11,7773	12,1061	12,6434	13,0758	13,7414	14,1681	15,0054	15,5022

Tablica 18. Promjene mase tikovina-PVC kompozita tijekom 29-dnevnog uranjanja u morsku vodu

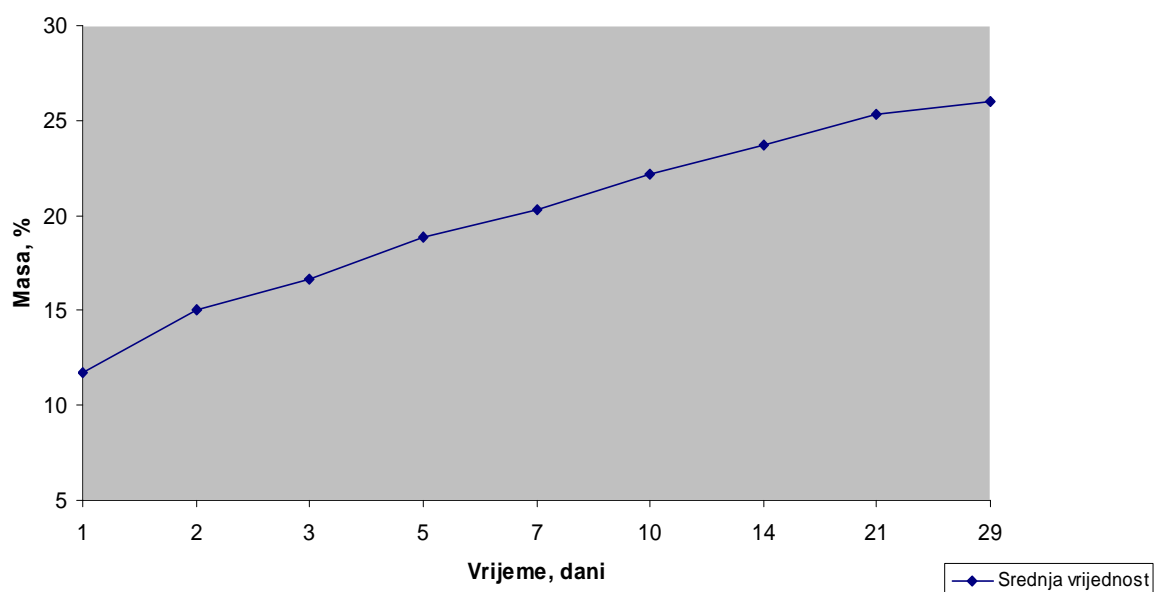
U tablicama 19., 20., 21. i 22. nalaze se vrijednosti promjene mase u postocima te srednje vrijednosti pomoću kojih su nacrtana zajedničke krivulje za pojedine ispitke.

		17.03.2009. 1. dan $\Delta G, \%$	18.03.2009. 2. dan $\Delta G, \%$	19.3.2009 3. dan $\Delta G, \%$	21.03.2009. 5. dan $\Delta G, \%$	23.03.2009. 7. dan $\Delta G, \%$	26.03.2009. 10. dan $\Delta G, \%$	30.03.2009. 14. dan $\Delta G, \%$	06.04.2009. 21. dan $\Delta G, \%$	14.04.2009. 29. dan $\Delta G, \%$
mahagonij-PVC u destiliranoj vodi	1	11,6108	14,9438	16,6987	18,5713	20,0503	22,0718	23,6321	25,6079	26,5162
	2	11,9941	15,2030	16,7133	18,9239	20,4496	22,2862	23,9402	25,5897	26,3034
	3	11,3650	14,5508	16,1621	18,2922	19,8021	21,6179	23,1122	25,0386	25,7266
	4	11,6218	14,7386	16,2705	18,4050	19,7927	21,6795	23,3495	24,9101	25,6529
	5	12,1830	15,6270	17,4544	19,9298	21,5768	23,3973	24,5922	25,4309	25,8394
	S	11,7549	15,0127	16,6598	18,8244	20,3343	22,2105	23,7252	25,3154	26,0077

Tablica 19. Vrijednosti promjene mase u postocima



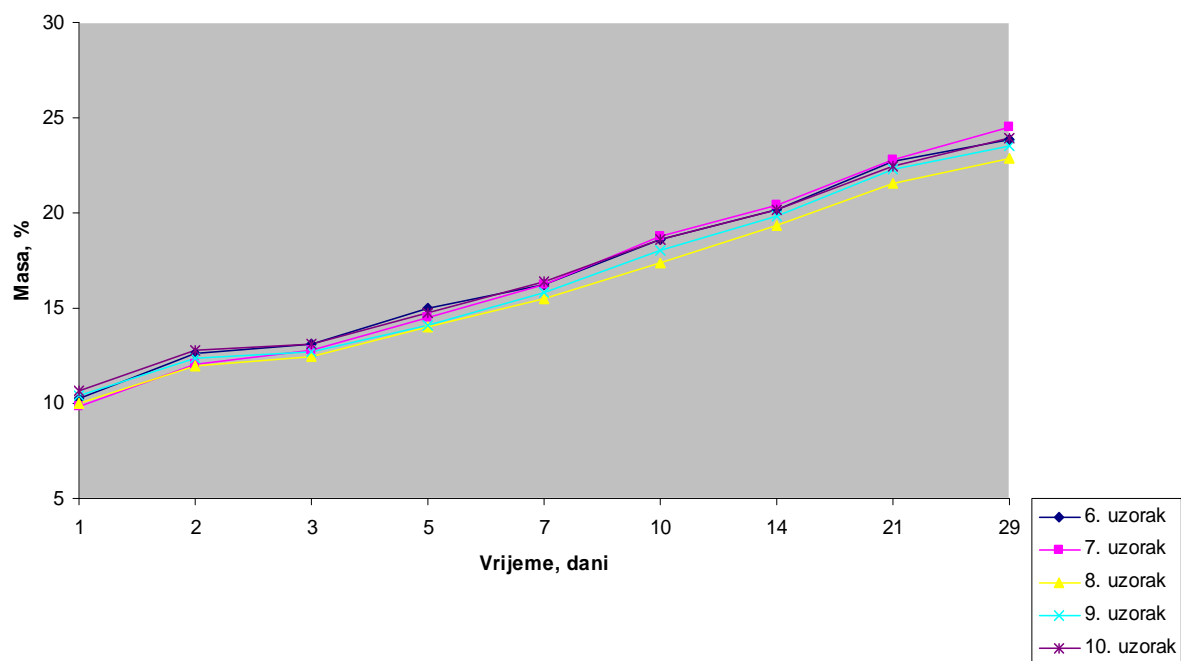
Slika 41. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u destiliranu vodu



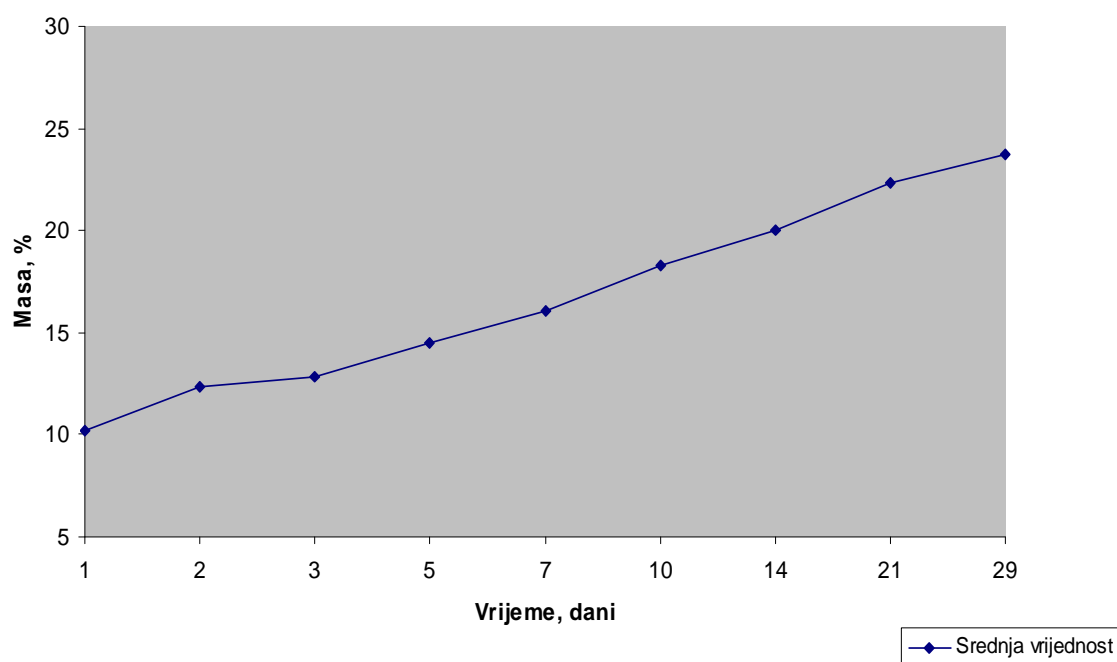
Slika 42. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u destiliranu vodu (srednje vrijednosti)

		17.03.2009. 1. dan $\Delta G, \%$	18.03.2009. 2. dan $\Delta G, \%$	19.3.2009 3. dan $\Delta G, \%$	21.03.2009. 5. dan $\Delta G, \%$	23.03.2009. 7. dan $\Delta G, \%$	26.03.2009. 10. dan $\Delta G, \%$	30.03.2009. 14. dan $\Delta G, \%$	06.04.2009. 21. dan $\Delta G, \%$	14.04.2009. 29. dan $\Delta G, \%$
mahagonij-PVC u morskoj vodi	1	10,2840	12,5900	13,1085	15,0015	16,2167	18,5656	20,1503	22,7071	23,8869
	2	9,8124	12,0792	12,7945	14,5260	16,2500	18,7487	20,4170	22,7538	24,5195
	3	10,0044	11,9717	12,4518	13,9799	15,4758	17,3448	19,3451	21,5220	22,9003
	4	10,4224	12,3880	12,6793	14,1359	15,7929	18,0717	19,8725	22,3141	23,5110
	5	10,6533	12,7543	13,1520	14,7733	16,3819	18,5980	20,1405	22,4779	23,9355
	S	10,2353	12,3566	12,8372	14,4833	16,0235	18,2657	19,9851	22,3550	23,7506

Tablica 20. Vrijednosti promjene mase u postocima



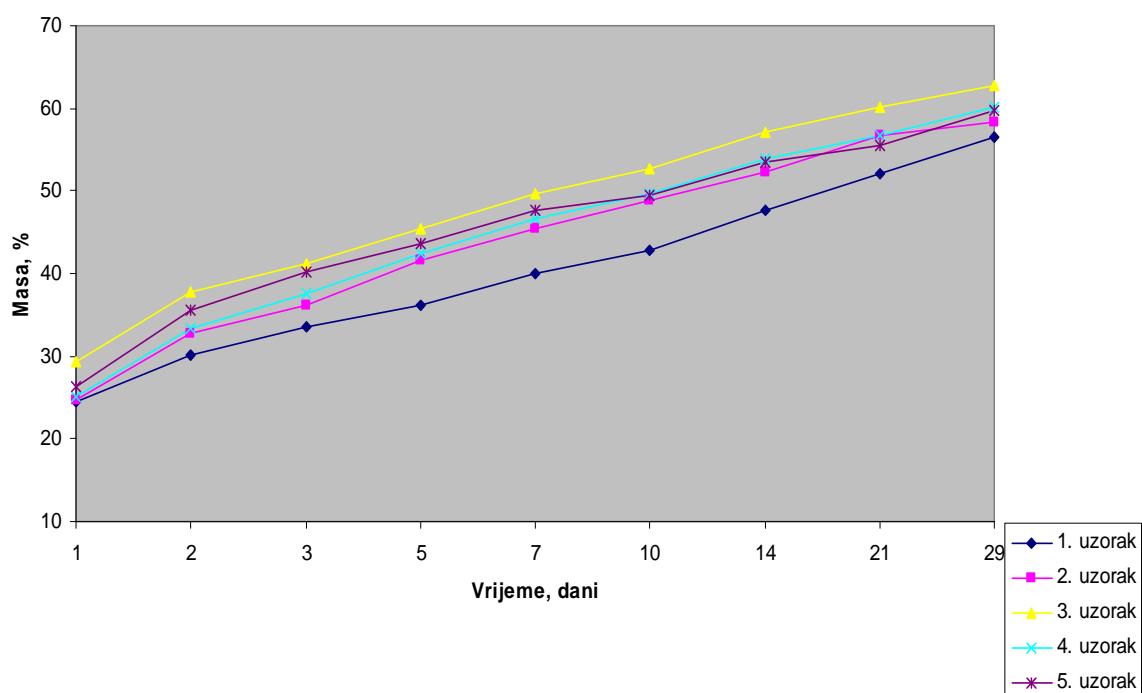
Slika 43. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u morsku vodu



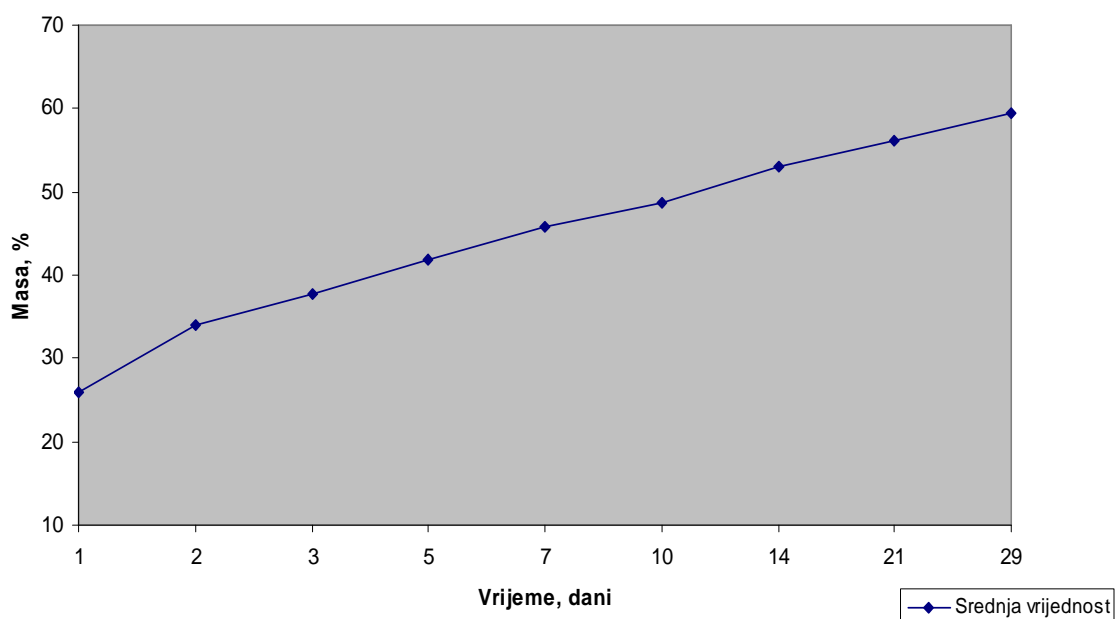
Slika 44. Apsorpcijska krivulja za kompozit mahagonij-PVC uronjen u morsku vodu
(srednje vrijednosti)

		17.03.2009. 1. dan $\Delta G, \%$	18.03.2009. 2. dan $\Delta G, \%$	19.3.2009 3. dan $\Delta G, \%$	21.03.2009. 5. dan $\Delta G, \%$	23.03.2009. 7. dan $\Delta G, \%$	26.03.2009. 10. dan $\Delta G, \%$	30.03.2009. 14. dan $\Delta G, \%$	06.04.2009. 21. dan $\Delta G, \%$	14.04.2009. 29. dan $\Delta G, \%$
tikovina-PVC u destiliranoj vodi	1	24,5160	30,2232	33,5923	36,2223	40,0179	42,8395	47,7120	52,1741	56,4264
	2	24,6881	32,8419	36,2236	41,5826	45,3604	48,8012	52,3560	56,7936	58,3962
	3	29,3279	37,8727	41,1242	45,4501	49,6723	52,6266	57,1375	60,1146	62,6970
	4	25,1074	33,3439	37,6168	42,3857	46,7228	49,6618	53,9182	56,6129	60,1740
	5	26,3413	35,5218	40,1907	43,6265	47,6272	49,4676	53,5413	55,4873	59,6319
	s	25,9961	33,9607	37,7495	41,8534	45,8801	48,6793	52,9330	56,2365	59,4651

Tablica 21. Vrijednosti promjene mase u postocima



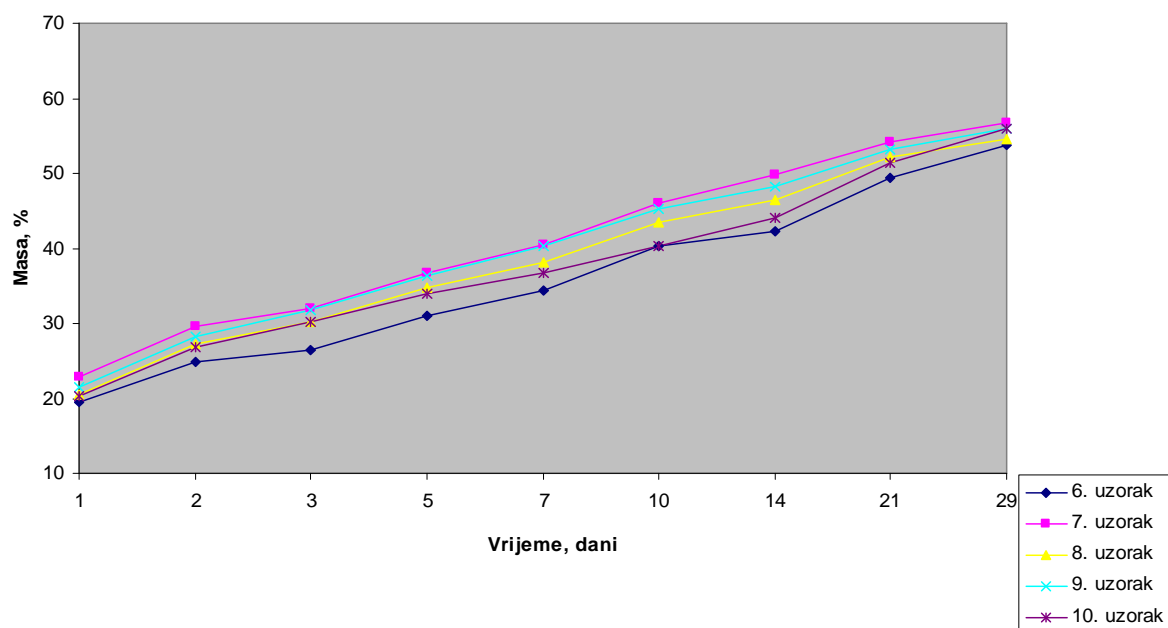
Slika 45. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u destiliranu vodu



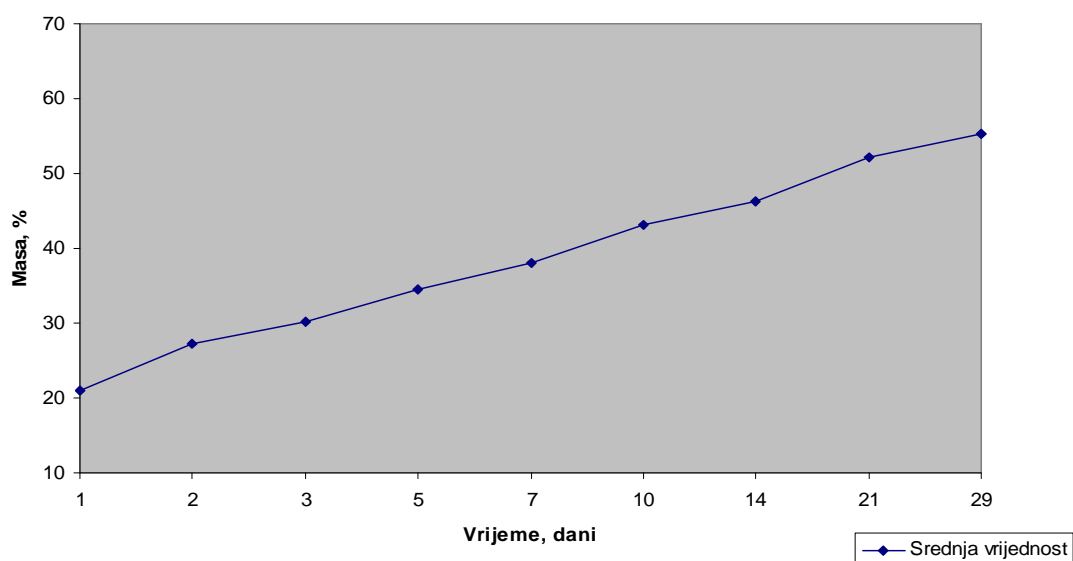
Slika 46. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u destiliranu vodu
(srednje vrijednosti)

		17.03.2009. 1. dan ΔG , %	18.03.2009. 2. dan ΔG , %	19.3.2009 3. dan ΔG , %	21.03.2009. 5. dan ΔG , %	23.03.2009. 7. dan ΔG , %	26.03.2009. 10. dan ΔG , %	30.03.2009. 14. dan ΔG , %	06.04.2009. 21. dan ΔG , %	14.04.2009. 29. dan ΔG , %
tikovina-PVC u morskoj vodi	1	19,5016	24,8194	26,4568	31,0145	34,2781	40,3567	42,2980	49,4915	53,7780
	2	22,8507	29,5893	31,9683	36,6803	40,5890	46,0647	49,8521	54,1228	56,6644
	3	20,5714	27,1310	30,1683	34,8342	38,1471	43,3904	46,5203	52,1987	54,5307
	4	21,5207	28,1775	31,7089	36,2690	40,2262	45,2213	48,2657	53,2172	55,9768
	5	20,3453	26,8760	30,2202	33,9547	36,6477	40,3677	43,9851	51,4278	56,0021
	S	20,9579	27,3186	30,1045	34,5505	37,9776	43,0802	46,1842	52,0916	55,3904

Tablica 22. Vrijednosti promjene mase u postocima



Slika 47. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u morsku vodu

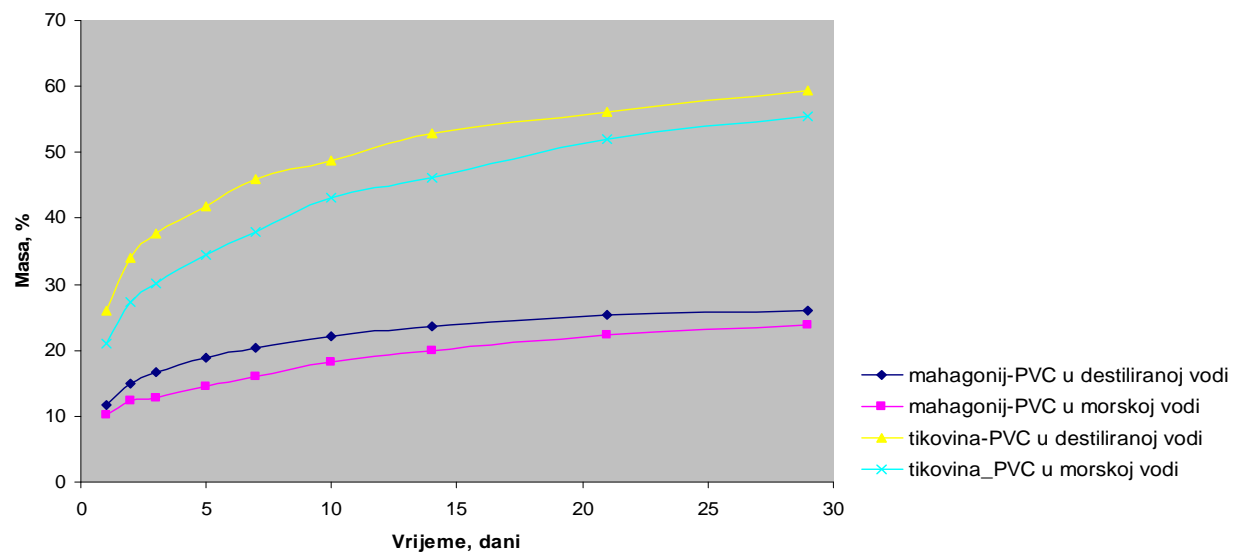


Slika 48. Apsorpcijska krivulja za kompozit tikovina-PVC uronjen u morsku vodu (srednje vrijednosti)

	17.03.2009. 1. dan ΔG , %	18.03.2009. 2. dan ΔG , %	19.3.2009 3. dan ΔG , %	21.03.2009. 5. dan ΔG , %	23.03.2009. 7. dan ΔG , %	26.03.2009. 10. dan ΔG , %	30.03.2009. 14. dan ΔG , %	06.04.2009. 21. dan ΔG , %	14.04.2009. 29. dan ΔG , %
mahagonij-PVC u destiliranoj vodi	11,7549	15,0127	16,6598	18,8244	20,3343	22,2105	23,7252	25,3154	26,0077
mahagonij-PVC u morskoj vodi	10,2353	12,3566	12,8372	14,4833	16,0235	18,2657	19,9851	22,3550	23,7506
tikovina-PVC u destiliranoj vodi	25,9961	33,9607	37,7495	41,8534	45,8801	48,6793	52,9330	56,2365	59,4651
tikovina-PVC u morskoj vodi	20,9579	27,3186	30,1045	34,5505	37,9776	43,0802	46,1842	52,0916	55,3904

Tablica 23. Srednje vrijednosti promjene mase u postocima

Slika 49. Apsorpcijske krivulje za kompozite (srednje vrijednosti)



Promjena mase uzrokovana upijanjem vode koja je prikazana apsorpcijskim krivuljama za pojedini kompozit i određeni medij kojem je taj kompozit bio izložen otkriva da je do znatno veće apsorpcije došlo kod kompozita tikovina-PVC u odnosu na kompozit mahagonij-PVC. Kompozit tikovina-PVC koji je 29 dana bio uronjen u destiliranu vodu apsorpcijom je ostvario promjenu mase od 59,47 %, dok je nakon boravka u morskoj vodi zabilježena promjena mase od 55,39 %. Promjena mase kompozita mahagonij-PVC nakon izloženosti destiliranoj vodi iznosila je 26,01 %, a nakon umočenosti u morskoj vodi 23,75 %.

Poznato je da količina apsorbirane vode ponajprije ovisi o količini šupljina kompozita, što se prvenstveno odnosi na komponentu koju čini upjenjeni PVC. Okom je vidljivo da je količina šupljina ekspandiranog PVC-a u kompozitu s tikovinom mnogo veća od količine u drugom kompozitu, što i uvjetuje intenzivnije upijanje vode. Veći početni udjel šupljina uvjetuje, uslijed djelovanja medija, i povećanje njihovog broja tijekom vremena.

U drvnom dijelu kompozita apsorpcija vode uzrok je težnje za postizanjem higroskopske ravnoteže, odnosno ravnoteže količine vode u stijenci stanice drva i vodene pare u zraku, u ovom slučaju vode određene temperature. Drvo upija vodu do stanja u kojem je pritisak okoline, medija u ravnoteži s pritiskom u kapilarama.

Voda apsorbira i u mikrokapilarnim prostorima koji nastaju u međusloju radi nepotpunog prijanjanja konstituenata kompozita, u ovom slučaju ploče upjenjenog PVC-a i furnira.

Obzirom na vrstu medija vidljivo je da je apsorpcija destilirane vode značajnija od apsorpcije morske. Veća apsorpcija destilirane od morske vode proizlazi iz razlike u gustoćama. Destilirana voda je rjeđa i radi toga lakše apsorbira u šupljinama i mikropukotinama.

.10.3. ODREĐIVANJE TVRDOĆE

U svrhu određivanja tvrdoće ispita primijenili smo dvije metode. *Metodom utiskivanja kuglice* ispitivanje se provodi mjerenjem dubine prodiranja kuglice u materijal pod opterećenjem. Ova metoda je statička, što znači da sila koja djeluje na utiskivač postepeno raste do maksimalne vrijednosti.



Slika 50. Tvrdomjer

	<p>Gdje su :</p> <p>S – debljina ispitnog tijela (minimalno 4 mm),</p> <p>D – promjer kuglice (5 mm),</p> <p>h – dubina prodiranja (0,15 do 0,35 mm),</p> <p>F – opterećenje (bira se u ovisnosti prema h)</p>
<p>Slika 51. Princip određivanja tvrdoće metodom utiskivanja kuglice</p>	

Opterećenje kod oba kompozita prije i nakon uranjanja je jednako i iznosi 49 N. Dubina prodiranja kuglice očitava se za vrijeme djelovanja opterećenja i to nakon 10, 20 i 60 sekundi, a dobivene dubine prodiranja za ispitke dane su u sljedećim tablicama.

Redni broj očitavanja	Dubina prodiranja, mm								
	Mahagonij - PVC						Tikovina - PVC		
	drvo			PVC			drvo		
	10'	20'	60'	10'	20'	60'	10'	20'	60'
1	0,165	0,170	0,175	0,225	0,235	0,250	0,150	0,155	0,160
2	0,145	0,150	0,155	0,225	0,240	0,255	0,165	0,170	0,175
3	0,155	0,160	0,165	0,230	0,240	0,255	0,145	0,150	0,155
4	0,150	0,155	0,165	0,220	0,225	0,240	0,165	0,170	0,175
5	0,165	0,170	0,175	0,230	0,240	0,260	0,145	0,150	0,155
6	0,160	0,165	0,170	0,240	0,250	0,270	0,145	0,145	0,150
7	0,150	0,150	0,155	0,240	0,250	0,265	0,160	0,170	0,175
8	0,165	0,170	0,175	0,235	0,240	0,260	0,195	0,200	0,205
9	0,150	0,155	0,160	0,240	0,250	0,260	0,205	0,210	0,215
10	0,165	0,170	0,175	0,250	0,255	0,270	0,200	0,210	0,215
S	0,157	0,162	0,167	0,234	0,243	0,259	0,168	0,173	0,178

Tablica 24. Dubina prodiranja h za suh kompozite

Redni broj očitavanja	Dubina prodiranja, mm								
	Mahagonij						Tikovina		
	drvo			PVC			drvo		
	10'	20'	60'	10'	20'	60'	10'	20'	60'
1	0,290	0,315	0,350	0,210	0,220	0,235	0,300	0,320	0,355
2	0,270	0,290	0,330	0,235	0,245	0,255	0,320	0,340	0,365
3	0,275	0,300	0,340	0,225	0,235	0,250	0,260	0,300	0,330
4	0,240	0,265	0,315	0,235	0,245	0,255	0,280	0,300	0,330
5	0,275	0,290	0,340	0,220	0,230	0,240	0,290	0,310	0,340
6	0,300	0,325	0,365	0,240	0,250	0,270	0,300	0,320	0,350
7	0,250	0,275	0,315	0,225	0,230	0,245	0,285	0,305	0,330
8	0,250	0,280	0,320	0,230	0,240	0,255	0,325	0,350	0,375
9	0,250	0,270	0,305	0,235	0,240	0,255	0,275	0,300	0,325
10	0,260	0,285	0,325	0,230	0,240	0,255	0,280	0,290	0,320
S	0,266	0,290	0,331	0,229	0,238	0,252	0,292	0,314	0,342

Tablica 25. Dubina prodiranja h za kompozite uronjene u destiliranu vodu

Redni broj očitavanja	Dubina prodiranja, mm								
	Mahagonij						Tikovina		
	drvo			PVC			drvo		
	10'	20'	60'	10'	20'	60'	10'	20'	60'
1	0,300	0,325	0,370	0,225	0,245	0,290	0,295	0,310	0,340
2	0,275	0,285	0,330	0,215	0,225	0,235	0,275	0,290	0,310
3	0,285	0,300	0,335	0,240	0,255	0,265	0,300	0,320	0,350
4	0,305	0,330	0,370	0,220	0,230	0,245	0,275	0,290	0,320
5	0,300	0,325	0,370	0,220	0,230	0,240	0,250	0,270	0,295
6	0,285	0,310	0,350	0,220	0,225	0,245	0,235	0,250	0,275
7	0,255	0,280	0,310	0,220	0,230	0,245	0,225	0,235	0,260
8	0,235	0,260	0,300	0,225	0,235	0,250	0,280	0,305	0,335
9	0,255	0,275	0,305	0,215	0,220	0,235	0,325	0,350	0,385
10	0,260	0,245	0,280	0,235	0,245	0,255	0,305	0,325	0,350
S	0,276	0,294	0,332	0,224	0,234	0,251	0,277	0,295	0,322

Tablica 26. Dubina prodiranja h za kompozite uronjene u morsku vodu

Pomoću izmjera dubina prodiranja kuglice jednostavno dolazimo do izračuna čvrstoće prema izrazu:

$$H = \frac{1}{D\pi} \frac{F}{h}, N/mm^2$$

U proračun se mora uvrstiti i korekcijski faktor koji za silu $F = 49 \text{ N}$ iznosi 0,001 (prema tablicama proizvođača uređaja).

Redni broj očitavanja	Tvrdća, N/mm ²								
	Mahagonij - PVC						Tikovina - PVC		
	drvo			PVC			drvo		
	10'	20'	60'	10'	20'	60'	10'	20'	60'
1	20,1	19,5	18,9	14,5	13,9	13,0	22,3	21,5	20,8
2	23,1	22,3	21,5	14,5	13,6	12,7	20,1	19,5	18,9
3	21,5	20,8	20,1	14,2	13,6	12,7	23,1	22,3	21,5
4	22,3	21,5	20,1	14,9	14,5	13,6	20,1	19,5	18,9
5	20,1	19,5	18,9	14,2	13,6	12,5	23,1	22,3	21,5
6	20,8	20,1	19,5	13,6	13,0	12,0	23,1	23,1	22,3
7	22,3	22,3	21,5	13,6	13,0	12,2	20,8	19,5	18,9
8	20,1	19,5	18,9	13,9	13,6	12,5	16,9	16,4	16,0
9	22,3	21,5	20,8	13,6	13,0	12,5	16,0	15,6	15,2
10	20,1	19,5	18,9	13,0	12,7	12,0	16,4	15,6	15,2
S	21,3	20,7	19,9	14,0	13,4	12,6	20,2	19,5	18,9

Tablica 27. Tvrdća suhog kompozita

Redni broj očitavanja	Tvrdća, N/mm ²								
	Mahagonij - PVC						Tikovina - PVC		
	drvo			PVC			drvo		
	10'	20'	60'	10'	20'	60'	10'	20'	60'
1	11,1	10,2	9,2	15,6	14,9	13,9	10,8	10,1	9,0
2	12,0	11,1	9,8	13,9	13,3	12,7	10,1	9,5	8,8
3	11,8	10,8	9,5	14,5	13,9	13,0	12,5	10,8	9,8
4	13,6	12,2	10,2	13,9	13,3	12,7	11,6	10,8	9,8
5	11,8	11,1	9,5	14,9	14,2	13,6	11,1	10,4	9,5
6	10,8	9,9	8,8	13,6	13,0	12,0	10,8	10,1	9,2
7	13,0	11,8	10,2	14,5	14,2	13,3	11,3	10,6	9,8
8	13,0	11,6	10,1	14,2	13,6	12,7	9,9	9,2	8,6
9	13,0	12,0	10,6	13,9	13,6	12,7	11,8	10,8	9,9
10	12,5	11,3	9,9	14,2	13,6	12,7	11,6	11,1	10,1
S	12,3	11,2	9,8	14,3	13,7	12,9	11,1	10,3	9,4

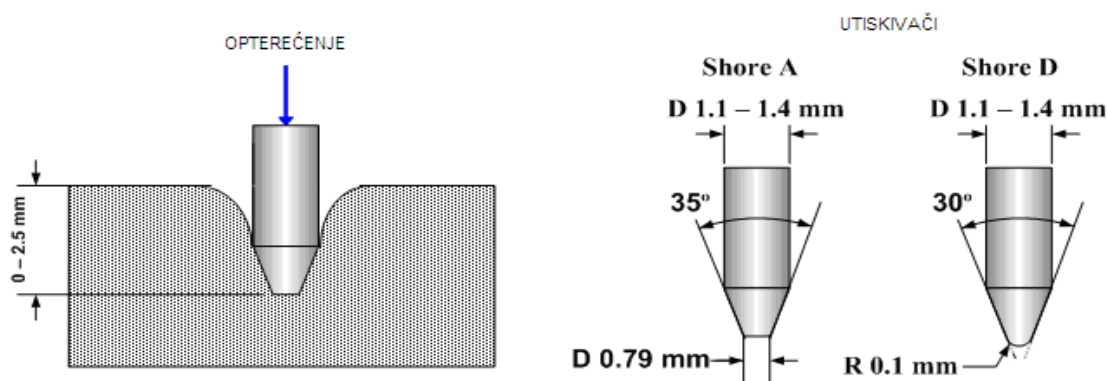
Tablica 28. Tvrdća kompozita uronjenog u destiliranu vodu

Redni broj očitavanja	Tvrdća, N/mm ²								
	Mahagonij – PVC						Tikovina- PVC		
	drvo			PVC			drvo		
	10'	20'	60'	10'	20'	60'	10'	20'	60'
1	10,8	9,9	8,7	14,5	13,3	11,1	11,0	10,4	9,5
2	11,8	11,3	9,8	15,2	14,5	13,9	11,8	11,1	10,4
3	11,3	10,8	9,6	13,6	12,7	12,2	10,8	10,1	9,2
4	10,6	9,8	8,7	14,9	14,2	13,3	11,8	11,1	10,1
5	10,8	9,9	8,7	14,9	14,2	13,6	13,0	12,0	11,0
6	11,3	10,4	9,2	14,9	14,5	13,3	13,9	13,0	11,8
7	12,7	11,6	10,4	14,9	14,2	13,3	14,5	13,9	12,5
8	13,9	12,5	10,8	14,5	13,9	13,0	11,6	10,6	9,6
9	12,7	11,8	10,6	15,2	14,9	13,9	9,9	9,2	8,3
10	12,5	13,3	11,6	13,9	13,3	12,7	10,6	9,9	9,2
S	11,8	11,1	9,8	14,6	14,0	13,0	11,9	11,1	10,1

Tablica 29. Tvrdća kompozita uronjenog u morsku vodu

Metodom utiskivanja kuglice nismo uspjeli odrediti tvrdoću PVC-a u kompozitu tikovina–PVC koji je premekan za ovaj način ispitivanja te smo primijenili i metodu mjerenja tvrdoće po Shore-u.

Tvrdoća po Shore-u je mjera otpora materijala prodiranju utiskivača konusnog izgleda pod opterećenjem u njega. Shore-ove skale se primjenjuju kod određivanja tvrdoće polimera. Shore-ova skala A koristi se za testiranje elastomera (gume) i ostalih mekih polimera, dok se kod ispitivanja tvrdih elastomera i većine ostalih polimernih materijala upotrebljava Shore-ova skala D. Postoji i skala 00 kojoj podliježu spužve i pjene. Opterećenje kod Shore-a A iznosi 822 grama, dok kod Shore-a D ono iznosi 4536 grama.



Slika 52. Utiskivači durometra



Testiranje tvrdoće po Shore-u provodi se instrumentom durometrom opremljenim utiskivačem, opterećenim kalibriranom oprugom, koji dubinom penetracije u materijal određuje njegovu tvrdoću

Slika 53. Durometar

Broj mjerjenja	Tvrdća, Sh					
	Mahagonij - PVC suhi		Mahagonij - PVC dest. Voda		Mahagonij - PVC mors voda	
	drvo	PVC	drvo	PVC	drvo	PVC
1	68,5	59,5	55,0	55,1	55,5	55,3
2	69,0	59,0	59,2	56,0	59,7	56,1
3	72,2	58,3	58,5	55,9	65,1	54,9
4	72,5	58,5	61,0	56,3	60,9	56,0
5	72,2	59,2	62,3	56,2	58,1	55,0
S	70,9	58,9	59,2	55,9	59,9	55,5

Tablica 30. Rezultati mjerenja tvrdoće po Shore-u za kompozit Mahagonij-PVC

Broj mjerjenja	Tvrdća, Sh					
	Tikovina - PVC suhi		Tikovina - PVC dest. Voda		Tikovina - PVC mors voda	
	drvo	PVC	drvo	PVC	drvo	PVC
1	63,2	45,5	47,0	42,3	60,9	43,2
2	64,7	44,2	55,1	46,5	50,1	44,5
3	69,8	45,3	49,1	41,3	54,0	42,0
4	72,3	44,7	50,5	46,0	58,0	43,1
5	69,0	45,2	51,3	42,1	58,0	43,0
S	67,8	45,0	50,6	43,6	56,2	43,2

Tablica 31. Rezultati mjerenja tvrdoće po Shore-u za kompozit Tikovina-PVC

	Tvrdća, Sh			
	Mahagonij-PVC		Tikovina-PVC	
	drvo	PVC	drvo	PVC
suhi	70,9	58,9	67,8	45,0
nakon boravka u destiliranoj vodi	59,2	55,9	50,6	43,6
nakon boravka u morskoj vodi	59,9	55,5	56,2	43,2

Tablica 32. Srednje vrijednosti tvrdoće po Shore-u

Tvrdoća upjenjenog PVC-a u suhom stanju je niža od tvrdoće drva u oba kompozita, što je znatno izraženije kod kompozita tikovina-PVC. Mahagonij je neznatno tvrđi od tikovine. Tvrdoća izmjerena utiskivanjem kuglice (srednja vrijednost) za suhi mahagonij nakon 10 sekundi iznosi $21,3 \text{ N/mm}^2$, nakon 20 sekundi $20,7 \text{ N/mm}^2$, a nakon 60 sekundi $19,9 \text{ N/mm}^2$. Taj isti materijal nakon što je bio uronjen u destiliranu vodu 29 dana dao je rezultate mjerenja tvrdoće $12,3 \text{ N/mm}^2$ nakon 10 sekundi, $11,2 \text{ N/mm}^2$ nakon 20 sekundi te $9,8 \text{ N/mm}^2$ nakon 60 sekundi. Nakon što je bio uronjen u morsku vodu tvrdoća mu je iznosila $11,8 \text{ N/mm}^2$ nakon 10 sekundi, $11,1 \text{ N/mm}^2$ nakon 20 sekundi i $9,8 \text{ N/mm}^2$ nakon 60 sekundi. Razlika u rezultatima mjerenja tvrdoće mahagonija prije i nakon uranjanja u vodu je značajna ($10,9 \text{ N/mm}^2$) iz čega proizlazi da voda ima veliki utjecaj na tvrdoću mahagonija, odnosno drva općenito, jer i mjerenje tvrdoće tikovine daje slične rezultate. Tvrdoća suhe tikovine nakon 10 sekundi iznosi $21,2 \text{ N/mm}^2$, nakon 20 sekundi $19,5 \text{ N/mm}^2$ te $18,9 \text{ N/mm}^2$. Tvrdoća tikovine nakon 29 dana provedenih u destiliranoj vodi iznosi $11,1 \text{ N/mm}^2$ nakon 10 sekundi, $10,9 \text{ N/mm}^2$ nakon 20 sekundi i $8,4 \text{ N/mm}^2$ nakon 60 sekundi. Rezultati nakon 29 dana u morskoj vodi jesu $11,9 \text{ N/mm}^2$ nakon 10 sekundi, $11,1 \text{ N/mm}^2$ nakon 20 sekundi, te $10,1 \text{ N/mm}^2$ nakon 60 sekundi. Iz ovih podataka slijedi zaključak da su uzorci uronjeni u destiliranu vodu imali veći gubitak tvrdoće.

Vrijednosti izmjerenih iznosa tvrdoća PVC komponenti kompozita se neznatno mijenjaju nakon boravka u vodi. Tvrdoća PVC-a u kompozitu s mahagonijem vrijednosti 58,9 Sh u suhom stanju smanjuje se na vrijednost 55,9 Sh nakon što je bio uronjen u destiliranu vodu, odnosno 55,5 Sh nakon morske vode, dok tvrdoća mekšeg PVC-a u kompozitu PVC-tikovina mijenja vrijednost 45 Sh u 43,6 Sh nakon boravka u destiliranoj vodi, te 43,2 Sh nakon što je bio uronjen u morskoj vodi. Neznatna promjena tvrdoće ekspandiranog PVC-a nakon izloženosti mediju dovodi do zaključka da voda gotovo nema utjecaja na njega.

10.4. ODREĐIVANJE PRIVIDNE MEĐUSLOJNE SMIČNE ČVRSTOĆE

Svojstva polimernih kompozita ovisna su o njihovom sastavu i građi, o svojstvima komponenata (matrica, ojačalo), te o jakosti veze između matrice i ojačala, odnosno između slojeva. Najčešći je oblik oštećenja polimernih kompozita raslojavanje ili delaminacija između pojedinih slojeva ili između matrice i ojačala.

Jedna od bitnih karakteristika o kojoj ovise mehanička svojstva i trajnost konstrukcijskih dijelova izrađenih od tih materijala je međuslojna smična čvrstoća, koja je mjera za kvalitetu granične površine, odnosno međusloja. Zato se posebna pozornost posvećuje određivanju te karakteristike polimernih kompozita. U tu se svrhu primjenjuju brojne metode koje se međusobno razlikuju prema obliku i dimenzijama epruveta, te o načinu njihova opterećivanja (savojno, vlačno, tlačno, itd.) Kod većine normiranih metoda određivanja mehaničkih svojstava polimernih kompozita najviše se primjenjuje savojni tip opterećenja.

U ovom ispitivanju prividne međuslojne smične čvrstoće primijenjena *metoda kratke grede* (Metoda BS 2782/3/341A-77). Ta metoda predstavlja modificiranu metodu ispitivanja na tri točke s vrlo kratkim razmakom oslonaca ($L = 5d$).

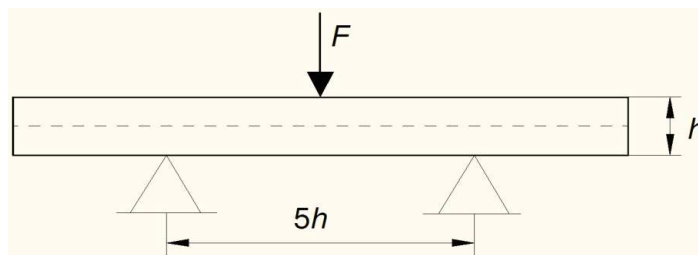


Prividna međuslojna smična čvrstoća T_M je vrijednost prividnogsmičnog naprezanja pri lomu ili kada je opterećenje maksimalno. Pri dimenzioniranju ispita treba se pridržavati sljedećih pravila:

Duljina i debljina ispitka trebaju imati odnos: $l = 10h$. Širina ispitka mora iznositi $b = 5h$

Slika 54. Metoda ispitivanja savijanjem na tri točke

Na slici 55. prikazani su oblik epruvete i način djelovanja opterećenja prema toj metodi.



Slika 55. Princip ispitivanja međuslojne smične čvrstoće metodom savijanja na tri točke

Ispitivanje se provodi univerzalnim strojem za ispitivanje mehaničkih svojstava polimernih kompozita. Mjeri se maksimalna sila uslijed koje nastaje lom epruvete, a rezultati se izračunaju prema izrazu:

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{F_{\max}}{b \cdot h}, N / mm^2$$

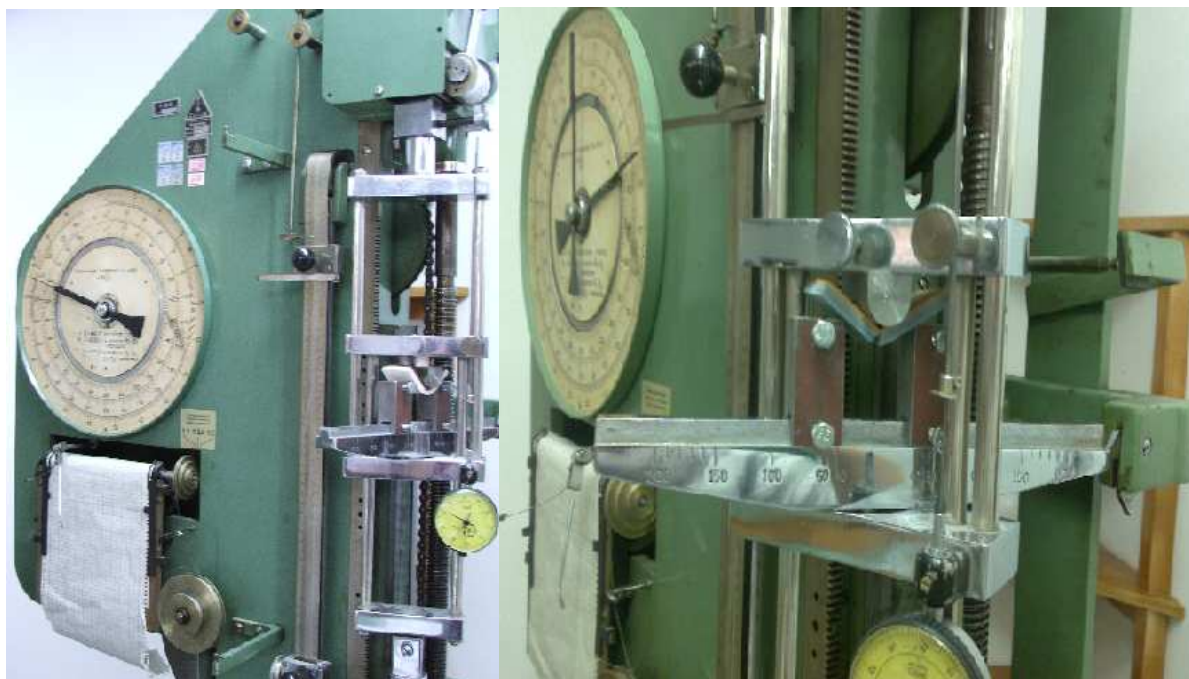
Gdje su:

τ - međuslojna smična čvrstoća, N/mm^2

F_{\max} - maksimalna sila, N

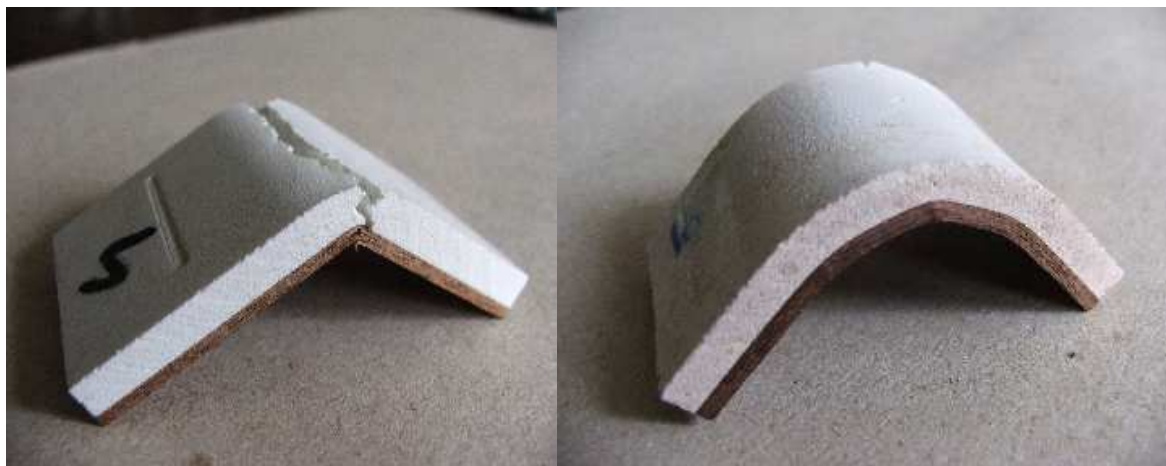
b - širina epruvete, mm

h - debljina epruvete, mm



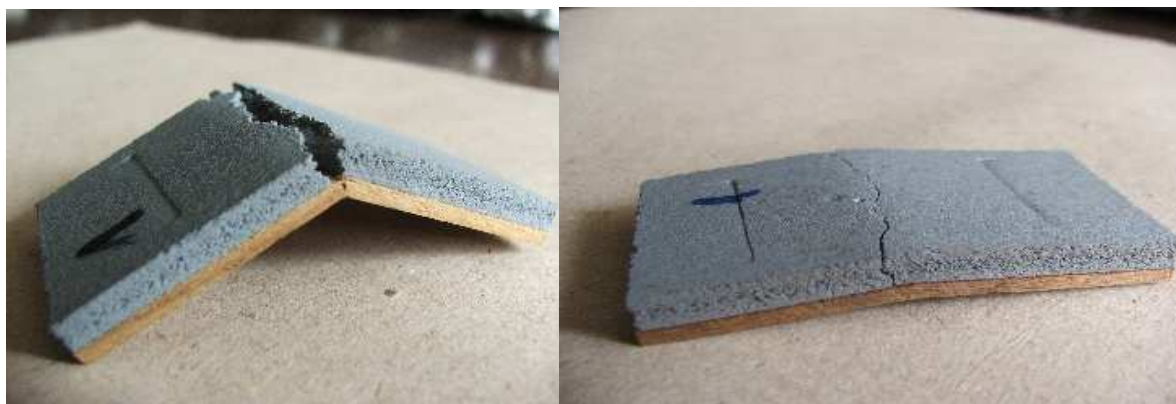
Slika 56. Kidalica

Slikama 57. i 58. prikazani su uzorci nakon ispitivanja njihove prividne međuslojne čvrstoće, a u tablicama 33., 34., 35., 36., 37. i 38. su navedeni brojčani rezultati.



Slika 57. Uzorci kompozita Mahagonij-PVC nakon ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće.

Lijevi uzorak testiran je suh, a desni je ispitivan nakon 29 dana provedenih u vodi.



Slika 58. Uzorci kompozita Tikovina-PVC nakon ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće.

Lijevi uzorak testiran je suh, a desni je ispitivan nakon 29 dana provedenih u vodi.

red. Br.	dimenzije epruvete		Razmak	Fmax	međuslojna čvrstoća
	b (mm)	h (mm)	L (mm)	N	N/mm ²
1	35,0	6,78		1540	4,9
2	34,9	7,02		1720	5,3
3	34,8	7,01		1600	4,9
4	34,8	7,32		1620	4,8
5	34,8	7,11		1530	4,6
S	34,9	7,05	35	1602	4,9

Tablica 33. Međuslojna čvrstoća za suhi kompozit Mahagonij-PVC

red. Br.	dimenzije epruvete		Razmak	Fmax	međuslojna čvrstoća
	b (mm)	h (mm)	L (mm)	N	N/mm ²
1	35,8	7,65		1970	5,4
2	35,9	7,58			
3	36,0	7,65		1470	4,0
4	35,9	7,60			
5	35,7	7,23			
S	35,9	7,54	38		

Tablica 34. Međuslojna čvrstoća za kompozit Mahagonij-PVC uronjen u destiliranu vodu

red. Br.	dimenzije epruvete		Razmak	Fmax	međuslojna čvrstoća
	b (mm)	h (mm)	L (mm)	N	N/mm ²
1	35,9	7,20		1900	5,5
2	35,7	7,29			
3	35,9	7,62		1500	4,1
4	35,8	7,52		1760	4,9
5	35,6	7,31		1660	4,8
S	35,8	7,39	37		

Tablica 35. Međuslojna čvrstoća za kompozit Mahagonij-PVC uronjen u morsku vodu

red. Br.	dimenzije epruvete		Razmak	Fmax	međuslojna čvrstoća
	b (mm)	h (mm)	L (mm)	N	N/mm ²
1	34,0	6,64		1080	3,6
2	34,2	6,68		1080	3,5
3	34,1	6,72		1060	3,5
4	34,1	6,63		1120	3,7
5	34,0	6,72		1070	3,5
S	34,1	6,68	33	1082	3,6

Tablica 36. Međuslojna čvrstoća za suhi kompozit tikovina-PVC

red. Br.	dimenzije epruvete		Razmak	Fmax	međuslojna čvrstoća
	b (mm)	h (mm)	L (mm)	N	N/mm ²
1	34,9	7,33		920	2,7
2	34,9	6,98		820	2,5
3	35,4	6,85		800	2,5
4	35,0	6,86		800	2,5
5	35,7	6,87		820	2,5
S	35,2	6,98	35	832	2,5

Tablica 37. Međuslojna čvrstoća za kompozit tikovina-PVC uronjen u destiliranu vodu

red. Br.	dimenzije epruvete		Razmak	Fmax	međuslojna čvrstoća
	b (mm)	h (mm)	L (mm)	N	N/mm ²
1	35,4	6,87		980	3,0
2	35,2	6,66		860	2,8
3	35,3	6,85		920	2,9
4	35,6	6,82		900	2,8
5	34,9	7,30		960	2,8
S	35,3	6,90	35	924	2,8

Tablica 38. Međuslojna čvrstoća za kompozit tikovina-PVC uronjen u morsku vodu

Srednja vrijednost međuslojne čvrstoće suhog kompozita mahagonij-PVC iznosi $4,9 \text{ N/mm}^2$. Njena vrijednost nakon izloženosti mediju znatno se povisila, osobito kod uzoraka koji su bili uronjeni u morskoj vodi. Za neke uzorke nismo dobiti vrijednosti maksimalne sile za izračunavanje smične čvrstoće, jer pri ispitivanju nije uopće došlo do loma. Ovo povećanje međuslojne čvrstoće uz djelovanje apsorbirane vode objašnjava se doprinosom vode napuštanju naprezanja u kompozitu, poznatom kao „efekt iscjeljivanja“.

Iznos prividne međuslojne čvrstoće kompozita tikovina-PVC smanjila se nakon što je kompozit 29 dana boravio uronjen u destiliranu, odnosno, morsku vodu. Srednja vrijednost smične čvrstoće suhog kompozita iznosila je $3,6 \text{ N/mm}^2$, nakon izloženosti destiliranoj vodi iznos se smanjio na $2,5 \text{ N/mm}^2$, dok se nakon boravka u morskoj vodi smanjio na $2,8 \text{ N/mm}^2$. Usporedimo li dobivene podatke za količinu apsorbirane vode i promjenu međuslojne čvrstoće vidljivo je da kompozit tikovina-PVC ima veći udjel šupljina te apsorbira i nešto veću količinu vode od kompozita mahagonij-PVC.

Šupljine i mikropukotine koje nastaju u međusloju zbog nepotpunog prijanjanja predstavljaju mjesta na kojima nema veze između konstituenata, a time niti odgovarajućeg prijenosa naprezanja, što prvenstveno utječe na međuslojnu čvrstoću kompozita.

11. ZAKLJUČAK

Materijali podvrgnuti ispitivanju u ovom radu jesu slojeviti kompoziti koji spadaju u skupinu korištenu za izradu „nestrukturnih dijelova“ broda. Preciznije, služe oblaganju vanjskih površina i unutarnjih podova plovila, gdje je poželjno osigurati protukliznost radi prisustva vode. Prednost ovih kompozitnih materijala, u odnosu na primjenu samog drva kao podne obloge na plovilima, prvenstveno je u značajno manjoj gustoći PVC komponente naspram drvene. Ploča upjenjenog PVC-a Vekaplan SF u kompozitu s mahagonijem gustoće je 650 kg/m^3 , dok je gustoća PVC ploče u kompozitu s tikovinom 550 kg/m^3 , za razliku od drvenog konstituenta čiji su iznosi gustoće otprilike 750 kg/m^3 za mahagonij, odnosno 900 kg/m^3 za tikovinu. Iz tih podataka proizlazi zaključak da ugradnjom ovih kompozita, umjesto drvenih podova iste debljine, smanjujemo masu plovila, te snižavamo njegovo težište, što rezultira većom brzinom, povećanjem nosivosti, smanjenjem potrošnje goriva, te poboljšanjem svojstva stabilnosti plovila. PVC pjena velike gustoće daje jedinstvenu sposobnost upijanja, reducira zvuk i ublažava udar koraka.

Uzmemo li u obzir djelovanje medija, uočljiva je znatna promjena mase ispitivanog kompozita nakon njegove 29-dnevne izloženosti vodi pri temperaturi od 50°C . Masa mahagonij-PVC kompozita porasla je za 26 % nakon izlaganja destiliranoj vodi, a nešto manje 23,75 % nakon izlaganja morskoj. Apsorpcija vode znatno je veća kod kompozita tikovina-PVC čija se masa nakon boravka u destiliranoj vodi povećala za 59,47 %, a nakon boravka u morskoj 55,39 %. Intenzitet apsorpcije uzrokovan šupljinama u kompozitu, mikropukotinama u međulsoju i težnjom drvene komponente za postizanjem higroskopske ravnoteže, u realnoj primjeni ovog kompozita opada. Uzroci leže u manjoj izloženosti djelovanju vode, odnosno češćem izmjenjivanju apsorpcije i desorpcije, tj. vlaženja i sušenja. Isto djelovanje umanjuje popuna fuga između trenica pri montiranju na plovilo. Poliuretansko brtvilo koje se primjenjuje otporno je na UV zrake, atmosferilije, te slatku i morsku vodu, a fleksibilnošću dozvoljava promjene dimenzija drvenih trenica pri djelovanju medija zaštićujući poroznije presjeke kompozita izravnom djelovanju vode.

Rezultati mjerenja tvrdoće kompozita ukazuju na puno značajniju promjena iznosa tvrdoće kompozita mjerenoj na strani drva, dok je na strani PVC-a razlika vrijednosti prije i nakon izlaganja mediju gotovo neznatna. Stabilnost ovog svojstva jedan je od razloga za izbor upjenjenog PVC-a kao konstituenta ovog kompozita.

Ispitivanjem prividne međuslojne čvrstoće kompozita uočili smo da je u slučaju kompozita mahagonij-PVC apsorbirana voda djelovala na napuštanje naprezanja u kompozitu što je rezultiralo povišenjem žilavosti i međuslojne čvrstoće. Taj učin vode poznat je kao „iscjeljujući efekt“. Kompozitnom materijalu tikovina-PVC su se iznosi međuslojne čvrstoće izmjereni ispitivanjem smanjili, a za pretpostaviti je da je uzrok toga u zamjetno većim i gušće raspoređenim šupljinama ekspaniranog PVC te u eventualnom nepotpunom prijanjanju dvaju konstituenta, koje rezultira šupljinama i mikropukotinama. Te mane međusloja predstavljaju mjesta na kojima nema veze između konstituenata, a time niti odgovarajućeg prijenosa naprezanja. Slaba veza između vlakna i osnove često uzrokuje napukline, a u konačnici i lom međusloja već pri malim opterećenjima zbog velike koncentracije naprezanja na tim mjestima.

Sve to ukazuje na važnost pripreme kompozita radi postizanja što homogenije strukture sa što manjim udjelom šupljina, te bitnost potpunijeg prijanjanja konstituenata, odnosno stvaranje što kvalitetnijeg međusloja koji uvelike utječe na mehanička svojstva kompozita.



Slika 59. Primjena „Deltex“ kompozita na plovilu



Slika 60. Primjena „Deltex“ materijala

LITERATURA

- [1] Zora Smolčić-Žerdik: *Polimeri kao konstrukcijski materijali*, Polimeri 19(1998), 8-12, 180-182
- [2] Zdravko Schauperl, *Kompozitni materijali*, Fakultet strojarstva I brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2007
- [3] Lawrence T. Drzal: *Interfaces and interphases*, ASM Volume 21: Composite, ASM Internationale, Michigan State University
- [4] Ante Lončar, Denis Vojvodić, Dragutin Komar: *Vlaknima ojačani polimer, Prvi dio: Osnove I problematika izgradnje*, Acta Stomatol Croat, 2006; 40: 72-82, <http://hrcak.srce.hr/file/17768>
- [5] Đurđica Španiček, Zora Smolčić, Šuhreta Husić: *Odnos apsorpcije vode, udjela šupljina I međuslojne čvrstoće polimernih kompozita*, Polimeri 19(1998), 8-12, 190-193
- [6] Richard P. Wool, Shrikant N. Khot, *Bio-Based Reisin and Natural Fibers*, ASM Volume 21: Composite, ASM Internationale, University of Delaware
- [7] Maja Rujnić-Sokele, Mladen Šercer, Božo Bujanić, *Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvno-plastomernog kompozita*, Polimeri 25(2004), 1-2, 12-19
- [8] Đurđica Španiček: *Predavanje, Drvo*, Fakultet Strojarstva I brodogradnje Sveučilišta U Zagrebu

- [9] *Materijali na osnovi drva*,
<http://www.gradri.hr/adminmax/files/class/Materijali%20na%20osnovi%20drva.pdf>
- [10] Igor Čatić, Maja Rujnić-Sokele, Gordana Barić: *Sistematizacija proizvodnje šupljikavih proizvoda*, Polimeri 29(2008), 3, 164-169
- [11] Janez Indof, Đurđica Španiček: *Primjena sendvič konstrukcija na osnovi polimernih materijala u brodogradnji*, XVI symposium Sorta, 2004,
<http://www.fsb.hr/sorta2004/abstract/t6-5-indof.pdf>
- [12] Jim Kindinger: *Lightweight Structural Cores*, ASM Volume 21: Composite, ASM Internationale, Hexcel Composites
- [13] Mraković: *Ispitivanje materijala*,
http://www.pfri.hr/~tomic/TMO/TMO%204%204_4_07.pdf
- [14] Šuhreta Husić: *Određivanje međuslojne smične čvrstoće polimernih kompozita*, Polimeri 19(1998), 8-12, 215-224